

**Anwendung operationsanalytischer Verfahren
in der Fertigung
illustriert am Fall einer Glasfabrik**

Inaugural - Dissertation

**zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
(Dr.rer.pol.)**

**an der Wirtschafts-und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Nürnberg**

**Vorgelegt von
Dipl.-Kfm. Manfred Walberer
aus Pressath/Opf.**

1969



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546218_0003

Anwendung operationsanalytischer Verfahren
in der Fertigung
illustriert am Fall einer Glasfabrik

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften
(Dr.rer.pol.)

an der Wirtschafts-und Sozialwissenschaftlichen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Nürnberg

Vorgelegt von
Dipl.-Kfm. Manfred Walberer
aus Pressath/Opf.



Referent: Professor Dr. Dr. h.c. Erich Schäfer

Korreferent: Professor Dr. Dr. B. Hartmann, Berlin

Tag der mündlichen Prüfung: 23. 7. 1969

MEINEN ELTERN

Gliederung

=====

	Seite
<u>Einleitung</u>	1
Teil 1:	
Operations Research in der Fertigung allgemein =====	5
A) Wesen und Verfahren des Operations Research	5
I. Allgemeiner Überblick	5
II. Geschichte, Wesen und Begriff des Operations Research	7
1. Geschichte	7
2. Wesen und Ziel der Unternehmensforschung	14
a) Optimalität	15
b) Methodik	17
c) Die Zielsetzung von Operations Research	28
3. Begriff	29
III. Gebiete des Operations Research	30
1. Überblick	30
2. Mathematische Programmierung (Mathematical Programming)	32
a) Lineares Optimieren	32
aa) Formaldarstellung des Standardmodells des Linear Programming	33
bb) Das allgemeine Produktionsmodell als betriebswirtschaftliche Interpretation des Standardmodells	35
cc) Die Voraussetzungen des Produktionsmodells	39
b) Nichtlineare Optimierung und andere Sonderfälle	41
aa) Non-Linear Programming	41
bb) Stochastische Optimierung	42

	Seite
cc) Ganzzahlige Optimierung . . .	43
dd) Parametrische Optimierung . .	44
ee) Dynamische Optimierung . . .	46
3. Die Spieltheorie	49
4. Die Netzplantechnik	54
5. Die Lagerhaltungstheorie	62
6. Die Ersatztheorie	68
7. Die Warteschlangentheorie	71
8. Experimentelle Verfahren	76
a) Begriff und Wesen der Simulation	76
b) Arten der Simulation	78
c) Durchführung der Simulation	81
B) Fertigung und Operations Research	83
I. Aufgaben der Fertigung	83
1. Abgrenzung des Sachproblems	84
2. Aufgaben der Fertigungsplanung	86
3. Das Verhältnis der Einzelaufgaben der Fertigungsplanung und die Stellung innerhalb des Gesamtplanungs- systems	88
II. Strukturierung des Fertigungsprogramms	91
1. Der Begriff des industriellen Ferti- gungsprogramms	91
2. Das Problem der Programmgestaltung .	93
a) Qualitative Überlegungen bei der Programmgestaltung	94
b) Die quantitative Programmgestal- tung	96
3. Die "linéare Programmplanung" . . .	99
a) Interpretation der Matrix A . . .	100
b) Die Interpretation der Vektoren b, c^T und x	102
4. Langfristige Programmplanung und wirtschaftliche Losgröße	105
III. Fertigungsablaufplanung	109
1. Abgrenzung	110

	Seite
2. Wesen und Aufgabe der Fertigungsablaufplanung	113
3. Die operationsanalytische Fertigungsablaufplanung bei den verschiedenen Fertigungssystemen	115
4. Problemstellung der Ablaufplanung bei der Fließfertigung und die operationsanalytischen Lösungsversuche	117
a) Problemstellung	117
b) Operationsanalytische Lösungsversuche	121
5. Problemstellung der Ablaufplanung bei der Werkstättenfertigung und die operationsanalytischen Lösungsversuche	124
a) Problemstellung	124
b) Optimierungsziele operationsanalytischer Fertigungsablaufplanung	127
c) Die Darstellung des Zuordnungsproblems und die Planungsbereiche der operationsanalytischen Fertigungsablaufplanung	129
aa) Aufteilung des Zuordnungsproblems in einzelne Phasen	130
bb) Lösungsmöglichkeiten des Reihenfolgeproblems	134
d) Operationsanalytische Zeitplanungsprobleme	139
6. Operationsanalytische Zwischenlager- und Transportplanung	147
IV. Bereitstellungsplanung	148
1. Betriebsmittel	149
2. Arbeitskräfte	149
3. Werkstoffe	150
C) Allgemeine Anwendungskriterien und Grenzen von Operations Research	153
I. Allgemeine Kriterien operationsanalytischer Anwendungsmöglichkeit	153
1. Quantifizierbarkeit der Modellelemente	153

	Seite
2. Das Vorliegen von Funktionen und Abhängigkeiten	158
3. Das Mitwirken und Verhalten des Menschen	161
a) Exekutiv-repetitive Tätigkeit	162
b) Schöpferische Tätigkeit	163
4. Weitere Kriterien	163
a) Umfang des Problems	163
b) Art der Daten	163
c) Grad der Verwirklichung des Massenprinzips	164
II. Allgemeine Grenzen des Operations Research	164
1. Abgrenzung	165
2. Ungenügende Übereinstimmung der Modelle mit der Wirklichkeit	166
a) Mangelnde Quantifizierbarkeit relevanter Einflußgrößen	167
b) Die Vernachlässigung vorhandener Abhängigkeiten	169
c) Die Interdependenz der Teilbereiche	169
d) Linearitätsbedingung der "Zielfunktion" und der Nebenbedingungen - vollständige Teilbarkeit der Faktoren	170
e) Die Annahme der Konstanz der Inputdaten	171
f) Die Vernachlässigung reaktiver Entscheidungen	172
g) Die Schwierigkeit der Bestimmung der "Zielfunktion"	173
h) Unsicherheit der Erwartung	175
3. Fehlendes mathematisches Instrumentarium	179
4. Mängel im Informationswesen	180
a) Informationsgewinnung	180
b) Informationsverarbeitung	182
5. Finanzielle, sachliche und personelle Grenzen	182
6. Wirtschaftlichkeitsüberlegungen	184

Teil 2:

Anwendungsmöglichkeiten von Operations Research im Fertigungsbereich der Glasfabrik	187
=====	

A) Geschichte und Herstellung des Glases . . .	187
--	-----

I. Kurzer geschichtlicher Überblick der Glasfabrikation	187
--	-----

II. Rohstoffe und Gemengezusammensetzung .	192
--	-----

1. Sand	193
-------------------	-----

2. Soda	194
-------------------	-----

3. Sulfat	194
---------------------	-----

4. Kalkstein	194
------------------------	-----

5. Seltener Rohstoffe	195
---------------------------------	-----

6. Gemengezusammensetzung	196
-------------------------------------	-----

III. Das Schmelzen des Glases und die groß- technische Tafelglasherstellung	196
--	-----

1. Schmelzvorgang	196
-----------------------------	-----

2. Die Tafelglasherstellung heute . . .	198
---	-----

3. Das FOURCAULT-Verfahren	199
--------------------------------------	-----

4. Zusammenfassende zeichnerische und beschreibende Darstellung der unse- rem Beispiel zugrundegelegten Tafel- glasherstellung nach FOURCAULT . . .	203
--	-----

B) Die Vorratslagerhaltung (Materialbewirt- schaftung) der Glasfabrik unter Berücksich- tigung der operationsanalytischen Lagerhal- tungstheorie	206
---	-----

I. Allgemeines	207
--------------------------	-----

II. Modellbildung	212
-----------------------------	-----

1. Beschaffungskosten	213
---------------------------------	-----

2. Lagerhaltungskosten	214
----------------------------------	-----

a) Zinsen	215
---------------------	-----

b) Steuern und Versicherungen . . .	215
-------------------------------------	-----

c) Kosten für Lagerung und Lager- transport	215
--	-----

	Seite
3. Fehlmengenkosten	215
4. Darstellung des Grundmodells der Lagerhaltung	216
5. Die ABC-Analyse als Kriterium des Einsatzes der Bestellmengenformel	218
III. Erweiterungen des Grundmodells	220
1. Zulassung von Fehlmengen	220
2. Die Berücksichtigung der Beschaffungszeit	224
3. Die Annahme mengenabhängiger Preise und zukünftiger Preiserhöhungen	225
4. Die Berücksichtigung von Nebenbedingungen	228
IV. Die Bestimmung der Meldemenge innerhalb der Lagerhaltung der Glasfabrik	234
V. Kritische Würdigung	240
C) Die Fertigungsprogrammplanung in der Glasfabrik	244
I. Grundvoraussetzungen für die Anwendung des Linear Programming bei der Fertigungsprogrammplanung und ihr Vorhandensein bei der Glasfabrik	244
1. Linearität von Kosten, Erträgen und Nebenbedingungen	247
a) Die Voraussetzung konstanter variabler Stückkosten k_v	247
b) Die Voraussetzung konstanter Verkaufspreise p_k	250
c) Die Trennung in fixe und variable Kosten	251
d) Die Linearität der Nebenbedingungen	253
2. Konstante Koeffizienten	256
3. Kurzfristige unveränderliche Kapazitäten	258
4. Die Analyse der Produktionszusammenhänge	260
5. Das Rechnen in Zeitmengen	262

	Seite
II. Die praktische Anwendung am Beispiel der Glasfabrik	266
1. Fertigungsprogramm, Fertigungstechnik und Kapazität der Anlagen . . .	266
2. Die Bestimmung der technischen Koeffizienten	269
3. Die Bestimmung der Deckungsbeiträge	273
4. Die Ermittlung des wirtschaftlichsten Fertigungsprogramms	279
5. Das modifizierte Fertigungsprogramm durch Berücksichtigung von Mindest- und Höchstmengen	289
III. Kritische Überlegungen über die Anwendung der linearen Programmplanung innerhalb der Glasfabrik aufgrund mangelnder Beherrschbarkeit der Produktion	290
1. Der Glasbruch	290
2. Der Glasverschnitt	292
3. Die Glasqualität	293
4. Darstellung eines vereinfachten Ansatzes	297
5. Zusammenfassung	300
D) Die Anwendung operationsanalytischer Verfahren bei der Ablaufplanung der Glasfabrik . .	303
I. Die optimale Belegung der Ziehmaschinen	303
1. Problemformulierung	304
2. Berechnung des Problems	306
a) Die Umformung der Matrix	309
b) Gewinnung einer Ausgangslösung .	310
c) Optimalitätstest und neue Lösung	314
3. Interpretation der Lösung und kritische Würdigung	318
II. Die optimale Belegung der Schneideinrichtungen	321
1. Problemformulierung	322

	Seite
Exkurs: Rechentechnische Probleme bei der Belegung der Schneid- maschinen	324
(1) Die Normalform	324
(2) Die Verbesserung des Programms .	327
(3) Die modifizierte Normalaufgabe .	330
(4) Ein Minimum als Zielfunktion . .	334
(5) Die optimale Schneidhausbelegung	337
2. Problemlösung und kritische Würdi- gung	340
III. Die optimale Transportplanung	342
1. Voraussetzungen eines Transportmo- dells in der Glasfabrik	343
2. Problemformulierung	344
3. Erweiterungen und kritische Würdi- gung	347
4. Die Optimierung der Anzahl der Transportmittel mit Hilfe der Warte- schlangentheorie	349
E) Die Anwendung operationsanalytischer Verfah- ren bei der Bereitstellungsplanung der Glas- fabrik	355
I. Die Anwendung der Ersatztheorie bei der Bereitstellungsplanung der Betriebsmit- tel	355
1. Betriebsmittel mit langsam abnehmen- der Leistungsfähigkeit	355
2. Betriebsmittel mit plötzlich auftre- tendem Ausfall	358
II. Die Bereitstellungsplanung der Arbeits- kräfte mittels operationsanalytischer Verfahren	359
1. Die Planung der Besetzung von Ausga- beschaltern mit Hilfe der Warte- schlangentheorie	359
2. Der optimale Einsatz von Arbeits- kräften bei unterschiedlicher Quali- fikation (assignment problem) . . .	364
a) Problemdarstellung	365

	Seite
b) Problemlösung	366
c) Kritische Würdigung	367
III. Die Bereitstellungsplanung der Werkstoffe mittels operationsanalytischer Verfahren	368
1. Überlegungen zum Mischungsproblem .	369
2. Das eindimensionale Verschnittproblem	371
a) Problemdarstellung	373
b) Problemlösung	375
c) Der allgemeine Ansatz des eindimensionalen Verschnittproblems .	380
d) Komplikationen und Erweiterungen des eindimensionalen Verschnittproblems	382
aa) Beschränkung der Anzahl der Schneidevorrichtungen	382
bb) Das Vorhandensein mehrerer Rohbreiten	383
cc) Die Einführung oberer und unterer Auftragsgrenzen	385
e) Rechnerische Schwierigkeiten und kritische Würdigung	386
3. Das zweidimensionale Verschnittproblem	388
a) Erstellung der Breitenkombinationen	389
b) Zuordnung einer Länge zu jeder Breitenkombination	390
c) Die Erstellung der Längenkombination	395
d) Problemlösung mit Hilfe der Simplexmethode	397
e) Erweiterungen und Komplikationen des Problemansatzes	408
aa) Beschränkte Anzahl von Längs- und Querschneidern	408
bb) Die Einführung von Höchst- bzw. Mindestmengen	408
cc) Die Berücksichtigung unterschiedlich großer Rohglasta- feln	409

	Seite
da) Rechnerische Schwierigkeiten und kritische Würdigung . . .	409
S c h l u ß =====	411

A b k ü r z u n g e n

=====

ADL-Nachrichten	= Zeitschrift für Arbeitsgemeinschaft für elektronische Datenverarbeitung und Lochkartentechnik
BFuP	= Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis
FAZ	= Frankfurter Allgemeine Zeitung
HdSW	= Handbuch der Sozialwissenschaften
HdW	= Handbuch der Wirtschaftswissenschaften
HWB	= Handwörterbuch der Betriebswirtschaft
J.Ind.Engng.	= The Journal of Industrial Engineering
JORSA	= Journal of the Operations Research Society of America
L.P.	= Linear Programming
Mgmt.Sci.	= Management Science
Nav.Res.Log.Quarterly	= Naval Research Logistic Quarterly
O.R.	= Operations Research
Operat.Res.Quarterly	= Operational Research Quarterly
Ufo	= Unternehmensforschung
ZfB	= Zeitschrift für Betriebswirtschaft
Z.f.d.ges. Staatswissenschaft	= Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft
ZfhF/ZfbF	= Zeitschrift für handelswissenschaftliche/betriebswissenschaftliche Forschung
ZwF	= Zeitschrift für wirtschaftliche Fertigung

V o r w o r t

In den vergangenen zehn Jahren ist in der Betriebswirtschaftslehre eine Vielzahl neuer und "weniger neuer" Verfahren und Methoden propagiert worden, die den Studierenden und Praktiker immer wieder mit der Frage konfrontiert haben: Kann man diese Verfahren in der Praxis überhaupt anwenden?

Angeregt durch diese - auch in anderen Zusammenhängen - immer wieder gestellte kritische Frage meines verehrten akademischen Lehrers, Professor Dr. Dr. h.c. Schäfer bin ich in der vorliegenden Dissertation daran gegangen, die Verfahren und Methoden von Operations Research anhand der Tafelglasherstellung und -verarbeitung auf ihre praktischen Anwendungsmöglichkeiten zu überprüfen. Aufgrund der relativen Neuheit und Heterogenität der O.R.-Verfahren habe ich zuerst versucht, dieses Gebiet, das aus den verschiedensten Quellen gespeist, in erster Linie unter pragmatischen Gesichtspunkten behandelt worden ist, allgemein in seinen Formen, Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen aufzuzeigen; bevor ich dann zur praxisbezogenen Modelluntersuchung überging, schien es mir zum besseren Verständnis für einen "Nichtglasspezialisten" auch notwendig, Geschichte und Herstellung des Glases umrißhaft darzustellen. Erst nach diesen vorbereitenden, ordnenden und einführenden Darlegungen habe ich das eigentliche Thema, die einzelnen Verfahren auf Betriebsgegebenheiten und Betriebsprobleme der Glasfertigung modellhaft anzuwenden, in Angriff genommen und in den meisten Fällen anhand einfacher Zahlenbeispiele durchgerechnet.

Ich möchte nicht versäumen, an dieser Stelle meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr. Dr. h.c. Schäfer, für

seine Unterstützung und Vermittlung sowie der Geschäftsleitung der Deutsche Tafelglas Aktiengesellschaft Fürth für ihr Verständnis und Hilfe meinen Dank auszusprechen.

Fürth, im Mai 1989

"Economic conditions are constantly changing, and each generation looks at its own problems in its own way. In England, as well as on the Continent and in America. Economic studies are being more vigorously pursued now than ever before; but all this activity has only shown the more clearly that Economic science is, and must be, one of slow and continuous growth."

Marshall, A.: Principles of Economics. An Introductory Volume. 8th Ed. London 1961, S. V

Einleitung:

=====

Eine Anzahl mathematisch-statistischer Verfahren, in Deutschland seit einigen Jahren unter dem Begriff Operations Research und einer Vielzahl deutscher Übersetzungen bekannt,¹⁾ hat, wie wenig andere Phänomene, die Aufmerksamkeit der betriebswirtschaftlichen Forschung und Praxis auf sich gezogen.²⁾ Es handelt sich hierbei,

1) Vgl. Umfrage der ZfB: Der Terminus "Operations Research und seine deutschen Übersetzungen". In: ZfB 1962 (32), S. 363 - 370

2) Vgl. Frenckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre und Verfahrensforschung - Operations Research -. In: ZfhF 1957 (9), S. 65 - 102

wie es vor allem der englische Ausdruck "Operations Research"¹⁾ recht gut wiedergibt, um eine Verfahrenstechnik, die der wissenschaftlichen Vorbereitung von Entscheidungen dienen soll. Ob und inwieweit eine Entscheidungsaufgabe mit Hilfe dieser Verfahrenstechnik gelöst werden kann, hängt dabei weniger von ihrer sachlichen Zugehörigkeit zu einem bestimmten Wissenschaftsgebiet ab, als vielmehr vom Vorhandensein gewisser formaler Kriterien, die in der Problemstruktur ihren Ausdruck finden.²⁾

Aufgabe dieser Arbeit wird es sein, festzustellen, inwieweit sich operationsanalytische Verfahren in der Fertigung einer Glasfabrik anwenden lassen, wobei von vornherein einige Einschränkungen zu machen sind.

Kennzeichnend für die Arbeitsweise des Operations Research ist neben anderen Kriterien die Teamarbeit, d.h. Wissenschaftler der verschiedensten Gebiete - Mathematiker, Physiker, Techniker, Wirtschaftswissenschaftler und Soziologen - arbeiten bei der Lösung eines betrieblichen Problems zusammen, wobei jeder die Erkenntnisse seiner Disziplin beim Modellaufbau und der Modelllösung beisteuert. Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird es nun nicht möglich sein, alle Aspekte der beteiligten Wissenschaftsgebiete zu berücksichtigen. Wir müssen uns vielmehr im wesentlichen auf die wirtschaftswissenschaftlichen Probleme beschränken.

-
- 1) Der Ausdruck "Operation" deutet auf den militärischen Ursprung hin, ansonsten könnte auch "action" oder "performance" stehen. Vgl. Kulhavy, E.: Operations Research - Die Stellung der Operationenforschung in der Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden 1963, S. 16
 - 2) Vgl. Zimmermann, W.: Modellanalytische Verfahren zur Bestimmung optimaler Fertigungsprogramme. Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der Operations Research Verfahren im Bereich der Programmplanung. Berlin 1966, S. 46 - 50

Ziel dieser Arbeit wird es nicht sein, ein bestimmtes Problem mit Hilfe operationsanalytischer Verfahren zu untersuchen. Es soll vielmehr angestrebt werden - ausgehend von den Problemstellungen und -lösungen in der Literatur - ähnliche Problemsituationen im untersuchten Betrieb zu finden, sie am vereinfachten Beispiel darzustellen und zu lösen.

Das damit kurz umrissene Vorgehen bei dieser Arbeit steht im Gegensatz zum üblichen Bearbeitungsablauf eines Operations Research-Problems, bei dem nämlich "das Problem" im Mittelpunkt der Überlegungen steht und vom Team, unter Verwendung der verschiedensten Verfahren, bearbeitet wird.

Teil 1:

Operations Research in der Fertigung allgemein
=====

A) Wesen und Verfahren des Operations Research

I. Allgemeiner Überblick

Die Frage, was man unter dem Begriff "Operations Research" im einzelnen zu verstehen hat, läßt sich nicht so ohne weiteres beantworten. Es erscheint dazu notwendig, die geschichtliche Entwicklung, das Wesen und die Verfahren einer näheren Betrachtung zu unterziehen.

In seiner Stellung zur Betriebswirtschaftslehre läßt sich "Operations Research" unter zwei Gesichtspunkten betrachten.¹⁾ Auf der einen Seite ist Operations Research als Sammelbezeichnung für die Verwendung von Verfahren der Mathematik, Statistik, Logik und anderer formal-wissenschaftlichen Disziplinen zu sehen, und ist damit von den Sachproblemen und den Gegenständen der Erfahrungswissenschaft unabhängig und außerhalb der Einzelwissenschaften stehend zu betrachten. Zum anderen stellt die Anwendung ihrer Methoden²⁾ eine Beziehung zu den Einzeldisziplinen her, die ihre fachliche Einbeziehung sinnvoll erscheinen läßt. Unter dem letztgenannten Aspekt engen wir unsere Betrachtung auf ein betriebs-

1) Vgl. Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre und Unternehmensforschung. Eine Untersuchung ihrer Standorte und Beziehungen auf wissenschaftstheoretischer Grundlage. In: ZfB 1964 (34), S. 742 - 762, hier S. 752

2) Wir wollen die Ausdrücke "Methoden" und "Verfahren" im Zusammenhang mit Operations Research in Übereinstimmung mit dem Großteil der Literatur synonym verwenden. Vgl. dagegen Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations Research - Eine Einführung in die Unternehmensforschung. Dt.: Schlecht, E. - Perschl, F., Wien - München 1961, S. 21, die eine ausdrückliche Unterscheidung anstreben.

wirtschaftliches Operations Research ein und wollen es als eine "angewandte Methodenlehre der Betriebswirtschaftslehre betrachten"¹⁾. Diesen abgegrenzten, auf die Betriebswirtschaftslehre bezogenen Begriff, wollen wir im folgenden verwenden. Eine derartige Einbeziehung des Operations Research in die Betriebswirtschaftslehre bedeutet jedoch nicht, daß Operations Research als wissenschaftliche Bewegung, als "Strömung zur Intensivierung der Forschung"²⁾, zu einer Teildisziplin der Betriebswirtschaftslehre oder gar zu einem propädeutischen Fach erniedrigt werden soll.³⁾ Aus der Sicht des Betriebswirtes, als Nutznießer des Operations Research, nimmt es als betriebswirtschaftliches Operations Research den Charakter einer Verfahrenstechnik⁴⁾ an, wobei eine disziplinäre Eigenständigkeit infolge eines fehlenden eigenen Erkenntnisobjektes nicht begründet werden kann.^{5) 6)}

Trotz allem anderweitigen Anschein kann aber von vornherein festgestellt werden, daß sich mit Operations Re-

-
- 1) Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 752
 - 2) Wittmann, W.: Betriebswirtschaftslehre und Operations Research. In: ZfhF (NF) 1958 (10), S. 285 - 296, hier S. 295
 - 3) Vgl. Kern, W.: Operations Research. Eine Einführung in die Optimierungskunde. Sammlung Poeschel, Stuttgart 1964, S. 22
 - 4) Vgl. Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 752
 - 5) Vgl. Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 752 und Wittmann, W.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 295
 - 6) Im Gegensatz dazu die meisten amerikanischen Autoren. Z.B. kommt Goodeve, Ch. zu dem Ergebnis, daß "operational research is a branch of science, which can claim a wholeness in its own right". Goodeve, Ch.: Operational Research as a Science. In: Operations Research for Management. Ed.: Mc Closkey, J.F. - Trefethen, F.N.: Baltimore 1954, Vol. I, S. 49 - 65, hier S. 65

search nicht etwas völlig Neues, bislang noch nicht Bekanntes, verbindet. Die deutsche Betriebswirtschaftslehre hat sich von jeher mit Problemen beschäftigt, die von ihrer Ausgabenstellung her in den Forschungsbereich von Operations Research fallen.¹⁾ Die Entwicklung von geeigneten methodischen Hilfsmitteln, die der Unternehmensführung bei der Entscheidungsfindung, dem sogenannten "Decision Making" dienlich sein sollen, ist nicht erst seit Bestehen von Operations Research ein Grundanliegen der Betriebswirtschaftslehre, hier speziell der pragmatisch orientierten Anwendung der Theorie - der Betriebswirtschaftspolitik.²⁾ Neu an Operations Research gegenüber früheren Bestrebungen ist lediglich der Versuch, mit Hilfe höherer und speziellerer Formen der Mathematik, Logik und Statistik, kompliziertere Entscheidungsprobleme zu lösen.³⁾

II. Geschichte, Wesen und Begriff des Operations Research

1. Geschichte

Obwohl es sich bei Operations Research um ein relativ junges Forschungsgebiet handelt, liegt der genaue Zeitpunkt der Entstehung nicht fest. Einigkeit besteht aber darüber, daß die ersten wohlgedachten und durchgeführten Versuche auf militärischem Gebiet gemacht worden sind, und zwar in England kurz vor Beginn des 2. Weltkrieges.⁴⁾ Ein Team von Wissenschaftlern hat damals in

1) Vgl. Angermann, A.: Industrielle Planungsrechnung. Bd. 1: Entscheidungsmodelle, Frankfurt/M. 1963, S. 9

2) Vgl. Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 752/53

3) Vgl. Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 9

4) Vgl. Brusberg, H.: Der Entwicklungsstand der Unternehmensforschung mit besonderer Berücksichtigung der Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden 1965, S. 28/29

Zusammenarbeit mit militärischen Stäben versucht, eine optimale Koordination des neuentwickelten Radarsystems mit der alten Methode der Beobachtungsstationen zur Überwachung des Luftraumes zu erreichen. Hierbei hat sich auch der Name "Operational Research" entwickelt, der sich nach seiner Übernahme durch die Amerikaner in "Operations Research" abwandelt und der heute in den meisten Ländern direkt oder übersetzt Verwendung findet.

Während des 2. Weltkrieges haben bei der Anwendung von Operations Research naturgemäß militärische Probleme im Vordergrund gestanden.¹⁾ Das Problem des optimalen Einsatzes von Menschen und Material bei Maximierung der gegnerischen und Minimierung der eigenen Verluste scheint aber so alt wie die Menschheit selbst zu sein. So nimmt es dann nicht wunder, wenn als Vorläufer von Operations Research schon ARCHIMEDES im 3. Jahrhundert v. Chr. herangezogen wird, der HIERON, dem Tyrannen von Syrakus, den optimalen Waffeneinsatz gegen die Römer errechnen soll.²⁾ Es erscheint daher unmöglich, alle Vorläufer von Operations Research zu beschreiben, ähnlich dem aussichtslosen Unterfangen, die Anfänge der Automation zu erforschen.³⁾

Zu den nichtmilitärischen Vorläufern, mit direktem Einfluß auf das heutige Operations Research, zählt BRUSBERG⁴⁾ die Arbeiten zu einer wirtschaftlichen Nutzen-

-
- 1) Die bekanntesten sind das Geleitzugproblem, das U-Boot-Suchproblem, das Bombardierungsproblem, das Radarproblem gewesen. Einzelheiten vgl. bei Kulhavy, E.: a.a.O., S. 24
 - 2) Vgl. Faure, R. - Boss, J.-P. - Le Garff, A.: Grundkurs der Unternehmensforschung für Studierende und Praktiker. Dt.: Th. Cornides, Franz.: La recherche opérationnelle. München 1962, S. 8
 - 3) Vgl. Böhm, W.: Die Planungsforschung (Operations-Research) in der Theorie der Unternehmung. Diss. Mannheim 1959, S. 9/10
 - 4) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 25

und Entscheidungstheorie von Jakob BERNOULLI (1654 - 1705), LAPLACE (1749 - 1827), FERMAT (1601 - 1665) und QUETELET (1796 - 1874).¹⁾

Mehr oder minder zufällig sind auch vereinzelte wissenschaftliche Untersuchungen wiederentdeckt worden, deren Charakter den heutigen Problemformulierungen der Unternehmensforschung²⁾ entspricht. So hat der Franzose MONGE³⁾ (1746 - 1818) - als Lehrer der Pioniertruppenschule von Mézière - untersucht, wie Erdarbeiten syste-

-
- 1) Vgl. auch Schneider, E.: Sinn und Grenzen der quantitativen Wirtschaftsforschung. In: Z.f.d.ges. Staatswissenschaft 1952 (108), S. 594 - 610, hier besonders 594 - 608
 - 2) Anstelle des englischen Ausdrucks "Operations Research" verwenden wir auch die deutsche Übersetzung Unternehmensforschung, die sich doch weitgehend durchgesetzt hat und auch durch eine gleichlautende Zeitschrift repräsentiert wird, obwohl gerade dieser Name der Gefahr der Verwechslung und irrtümlichen Auslegung besonders ausgesetzt ist, da mit "Unternehmen" nicht die wirtschaftliche Einheit von Arbeit und Kapital der Betriebswirtschaft, sondern das Handeln, das Unternehmen, als Tätigkeit ganz allgemein, gemeint ist. Andere Namen, wie etwa Aktions- oder Handlungsanalyse erscheinen unseres Erachtens besser, sind aber in der Literatur nicht so weit verbreitet. Neben Unternehmensforschung verwenden wir noch "operationsanalytisch" als Adjektiv. Zur Diskussion über Definitionen und deutsche Übersetzungen vgl. auch: Müller-Merbach, H.: Operations Research als Optimalplanung. In: ZfhF (NF) 1963 (15), S. 191 - 206 und Kern, W.: Operations Research als Optimierungskunde. In: ZfhF (NF) 1963 (15), S. 345 - 349 sowie Kulhavy, E.: a.a.O., S. 16 - 21 und Kilger, W.: Planungsrechnung und Entscheidungsmodelle des Operations Research. In: Agplan, Unternehmensplanung als Instrument der Unternehmensführung, Bd. 9, S. 55 - 75 mit einer Aufzählung der Autoren, die den Ausdruck Planungsrechnung verwenden. Im Gegensatz zu letzteren verwendet Schäfer den Ausdruck Planungsrechnung für Rentabilitätsberechnungen und Wirtschaftlichkeitsvorschläge. Vgl. Schäfer, E.: Die Unternehmung. 4. Aufl. Köln/Opladen 1963, S. 405
 - 3) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 25

matisch mit möglichst geringem Aufwand durchgeführt werden können und sein Landsmann CONDORCET (1743 - 94) hat Untersuchungen über Entscheidungen bei Abstimmungen angestellt, deren Gehalt man erst wieder nach eineinhalb Jahrhunderten ermessen kann.¹⁾

DANTZIG²⁾ sieht die Ursprünge des "Linear Programming" - einem der Hauptanwendungsgebiete von Operations Research - wirtschaftswissenschaftlich im "Tableau Economique" von QUESNAY (1759), im System WALRAS (1874) sowie im LEONTIEF'schen Modell (1936) und mathematisch in den Theorien von FOURIER (1823), GAUSS (1826), GORDAN (1873), MINKOWSKI (1896), FARKAS (1903), STIEMKE (1915), NEYMAN (1936) und WALD (1939).

TREFETHEN³⁾ berichtet, daß um 1920 H.C. LEVINSON als ausgebildeter Astronom die wissenschaftlichen Methoden der Astronomie auf wirtschaftliche Probleme angewandt und mit deren Hilfe die Ursachen der Nichtannahme der Waren eines Versandgeschäfts untersucht hat. A.K. ERLANG - ein dänischer Ingenieur - hat in seinen ab 1909 durchgeführten Arbeiten über den Telephonverkehr in Kopenhagen die Grundlagen zu der heutigen "Theorie der Warteschlangen" gelegt.⁴⁾ L.W. KANTOROWITSCH (Sowjetunion) entwickelte im Jahre 1939 einen Algorithmus für Aufgaben, die dem heutigen "Linear Programming" entsprechen,

1) Vgl. Faure, R. - Boss, J.-P. - Le Garff, A.: a.a.O., S. 8

2) Vgl. Dantzig, G.B.: Lineare Programmierung und Erweiterungen. Dt.: A. Jäger, Berlin - Heidelberg - New York 1966, S. 15

3) Vgl. Trefethen, F.N.: A History of Operations Research. In: Operations Research for Management. Vol. I. Hrsg.: Mc Closkey, J.F. - Trefethen, F.N., Baltimore 1954, S. 3 - 35, hier S. 29

4) Vgl. Saaty, Th.L.: Elements of Queueing Theory with Applications. New York, Toronto, London 1961, S. 20 - 25

der aber auch in seinem eigenen Land nahezu völlig unbekannt geblieben ist.¹⁾

Nach dem zweiten Weltkrieg finden die neuen Techniken aufgrund der während des Krieges gemachten positiven Erfahrungen relativ schnell Eingang im zivilen Bereich. Besonders in England, dessen Wirtschaft eine Erhöhung der Produktivität und des Exports dringend notwendig hat, vollzieht sich die Umwandlung der militärischen Unternehmensforschung auf die Bedürfnisse der zivilen Industrie rasch und mit ministerieller Unterstützung.²⁾

In Amerika, wo das industrielle Beratungswesen schon vor dem Kriege einen beträchtlichen Umfang erreicht hat, müssen sich die neuen Methoden im Wettbewerb mit den bisher von diesen Instituten angewandten Techniken bewähren.³⁾ Ab 1951 ist hierbei, mit Unterstützung des "Committee on Operations Research" des "National Research Council", der entscheidende Durchbruch gelungen. Im Jahre 1954 sind schon etwa 1500 Unternehmensforscher tätig gewesen.⁴⁾ In England zählt man zur gleichen Zeit schon über 40 "Operational Research Sections". Auch in Frankreich, wo 1955 der erste Kongreß über "recherche opérationnelle" stattgefunden hat, soll die Zahl der auf diesem Gebiet Tätigen bereits beträchtlich sein.⁵⁾ 6)

-
- 1) Vgl. Krekó, B.: Lehrbuch der linearen Optimierung. Berlin 1964, S. 12. Diese Aussage wird übrigens von Dantzig, dem späteren Erfinder der Simplexmethode - dem allgemeinsten und wichtigsten Lösungsverfahren des Linear Programming - bestätigt.
 - 2) Vgl. Trefethen, F.N.: a.a.O., S. 31
 - 3) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 36. In diesem Buch finden sich weitere interessante Daten zur Entwicklung von Operations Research in den einzelnen Ländern.
 - 4) Vgl. Trefethen, F.N.: a.a.O., S. 31
 - 5) Vgl. Käfer, K.: Betriebswirtschaftliche Verfahrensforschung im Dienste der Unternehmensführung. In: Aktuelle Fragen der Unternehmung. Hrsg.: Ulrich, H. - Trechsel, F.: Gedenkschrift für Alfred Walther. Bern 1957, S. 109 - 141, hier S. 138
 - 6) Fußnote siehe Seite 12

Auch in die Universitäten und Hochschulen hat Operations Research als neues Lehrgebiet zuerst in England und Amerika Eingang gefunden. Die ersten Kurse für nicht-militärisches Operations Research sind im Jahre 1948 vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Zusammenarbeit mit der Marine in den USA veranstaltet worden. In England ist das University College in London im Herbst 1949 gefolgt und im Juli 1950 hat die Birmingham University entsprechende Vorlesungen eingeführt.

In Deutschland hat Operations Research nur zögernd Aufnahme gefunden. Als Grund hierfür kann vielleicht der, durch die wissenschaftliche Isolierung während des 2. Weltkrieges bedingte, sich vorerst auf andere Teilgebiete konzentrierende, Nachholbedarf angesehen werden. Eine andere Ursache mag darin liegen, daß einzelne Fragestellungen der Unternehmensforschung schon früher in Deutschland behandelt worden sind und Operations Research damit als gar nichts so "Neues" erschienen ist.

Die ersten, wenn auch vereinzelt veröffentlichten erscheinen in Deutschland allerdings auch schon 1949. So hat der Astrophysiker Professor SIEDENTOPF von der Universität Tübingen in den "Physikalischen Blättern" in einem Aufsatz mit dem Titel "Planungsforschung" einige Wesenszüge von Operations Research beschrieben.^{1) 2)}

6) Fußnote von Seite 11:

Vgl. Mattesich, R.: Unternehmensforschung. In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 411 - 423, hier Fußnote S. 411. Er schätzt etwa 15.000 - 20.000 Personen, die sich mit dem Gebiet des "Management Science" beschäftigen.

1) Vgl. Siedentopf, H.: Planungsforschung. In: Physikalische Blätter 1949, S. 201 - 205

2) Die von Brusberg, H.: a.a.O., S. 238, angeführte Veröffentlichung von Preuschen, G.: Operational Research in German Agriculture. In: Research 1949, S. 455 - 58 London, bezieht sich nicht auf die Unternehmensforschung, sondern zeigt nur eine zufällige Übereinstimmung der Titel.

M. KNAYER¹⁾ veröffentlicht im Oktober 1953 in "Rationalisierung" einen Aufsatz "Die Ablauf- und Planungsforschung".

Weitere Etappen sind 1955 die Studienreise einer kleinen deutschen Gruppe interessierter Fachleute in die USA zum Studium der Verfahren und Anwendungen von Operations Research,²⁾ die Sitzung zweier Ausschüsse der "Deutschen Statistischen Gesellschaft" in Essen über das Thema "Unternehmensforschung - Operations Research",³⁾ die Gründung des Arbeitskreises "Operational Research" im Dezember 1956 in Berlin⁴⁾ und die 1956 erstmals erscheinende Zeitschrift "Unternehmensforschung", die von A. ADAM und S. SAGOROFF vom Institut für Statistik an der Universität Wien für den deutschsprachigen Raum herausgegeben wird.⁵⁾

Auch die Betriebswirtschaftslehre hat ihre Zurückhaltung seit 1957 weitgehend aufgegeben und sich um eine der deutschen Entwicklung entsprechende Einordnung bemüht.⁶⁾ An den Universitäten hat Operations Research bei den verschiedenen Fachrichtungen Beachtung gefunden; doch

-
- 1) Vgl. Knayer, M.: Die Ablauf- und Planungsforschung. In: Rationalisierung 1953 (4), S. 273 - 276
 - 2) Vgl. RKW-Auslandsdienst: Ablauf- und Planungsforschung - Operations Research - Heft 56, München 1958
 - 3) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 238
 - 4) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 239
 - 5) Vgl. Ufo 1956 (1)
 - 6) Vgl. Frenckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 65 - 102
Wittmann, W.: Betriebswirtschaftslehre und Operations Research, a.a.O., S. 285 - 296
Kosiol, E.: Modellanalyse als Grundlage unternehmerischer Entscheidungen. In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 318 - 334
Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 742 - 762
Kulhavy, E.: a.a.O., S. 32 - 48

kann die beachtliche Zahl von 70 Instituten, Seminaren und Lehrstühlen, die sich mit Operations Research beschäftigen, nicht darüber hinwegtäuschen, daß die wissenschaftliche Arbeit auf diesem Gebiet, verglichen etwa mit anderen Ländern, noch von bescheidenem Umfang ist.¹⁾ Für die Praxis und Forschung bedeutsam ist weiter im Jahre 1961 - nach Vorarbeiten des "Deutschen Ausschusses für Unternehmensforschung (DAUF)" - die Gründung der "Deutschen Gesellschaft für Unternehmensforschung (DGU)" in München geworden, die sich neben dem "Arbeitskreis Operational Research" um die Entwicklung, Weiterverbreitung und Anwendung der Verfahren des Operations Research bemüht.²⁾

Die Aufstellung von betriebseigenen Operations-Research-Teams beginnt 1957 bei der "Bergbau, AG Ewald König Ludwig", Recklinghausen, bei den "Mannesmann Hüttenwerke", Duisburg und beim "Verein Deutscher Eisenhütteleute" (VDEh).³⁾

2. Wesen und Ziel der Unternehmensforschung

Beim Versuch, Wesen und Ziel der Unternehmensforschung festzulegen, müssen wir feststellen, daß darüber noch keine klaren Vorstellungen herrschen, da es sich bei Operations Research um eine Sammelbezeichnung für völlig heterogene Dinge handelt, wobei weder eine neue Wissenschaft, noch einheitliche Probleme und Methoden vorliegen.⁴⁾ Immerhin lassen sich zur Klarstellung einige Kri-

1) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 248 - 264, S. 290 - 303 sowie eine Zusammenstellung über abgehaltene Vorlesungen in Operations Research an den verschiedenen Universitäten, S. 304 - 312

2) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 244 - 246

3) Vgl. Brusberg, H.: a.a.O., S. 239

4) Vgl. Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 327

terien anführen, die übereinstimmend von den meisten Autoren zur Charakterisierung herangezogen werden.¹⁾

a) Optimalität²⁾

Bei der Lösung von Problemen des Operations Research wird immer ein Optimum angestrebt, z.B. in Form von optimalen Gewinnen, Kosten oder Wartezeiten. Die Unternehmensforschung versucht dabei, aus einer Anzahl möglicher Alternativen, den optimalen Weg, der zu einem von den Unternehmensleitungen vorgegebenen Ziel führt, herauszufinden. Dabei muß sich die Optimallösung nicht nur auf einen bestimmten Punkt beschränken, sondern sie kann sich auch - verursacht durch Datenungenauigkeiten und Modellvereinfachungen - mit einem optimalen Bereich begnügen, der mit wirtschaftlich vertretbarem Rechenaufwand zu realisieren ist. Die Frage, ob Total- oder Suboptima angestrebt werden sollen, ist solange von akade-

1) Vgl. Müller-Merbach, H.: Operations Research als Optimalplanung ..., a.a.O., S. 193/194

2) Das Kriterium der "Optimalität" führen unter anderem an: Kregeloh, H.: Ziel und Wesen von Operations Research. In: Zwf 1960 (55), S. 361 - 364, besonders S. 361

Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations Research - Eine Einführung in die Unternehmensforschung. Dt.: Schlecht, E. - Ferschl, F. Engl.: Introduction to Operations Research. Wien - München 1961, S. 26

Frenckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 69

Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 322

Lesourne, J.: Unternehmensführung und Unternehmensforschung. Dt.: R.G.Th. v. Cornides, Franz.: Technique Economique et Gestion Industrielle. München - Wien 1964, S. 10/11

Solche Optimalisierungsüberlegungen sind in der Betriebswirtschaftslehre keineswegs neu. Man denke dabei nur an das ökonomische Prinzip (vgl. Schäfer, E.: Die Unternehmung ..., a.a.O., S. 291). Aber erst mit dem Aufkommen neuer Rechenverfahren ist es möglich geworden, von den wirtschaftlich unrealistischen ceteris-paribus Voraussetzungen zu den, der Wirklichkeit mehr entsprechenden, mutatis-mutandis Annahmen überzugehen. (Vgl. Kern, W.: Operations Research - Einführung ..., a.a.O., S. 9/10)

mischer Bedeutung, wie es nicht gelungen ist, ein Totaloptimum zu errechnen, und zwar unter Beachtung aller Einflußfaktoren.¹⁾ Dem "Prinzip der Ganzheitsbetrachtung"²⁾, wie es von MELLEROWICZ bezeichnet wird, ist zwar als hypothetisches Ziel zuzustimmen, in der Realität müßte es jedoch erst möglich sein, mit Operations Research "dem komplexen Charakter der Wirklichkeit gerecht zu werden".³⁾ Solange dies nicht gelingt, wird man sich auf Teilanalysen⁴⁾ mit ihrer Problematik für das Ganze beschränken und versuchen müssen, die Teilprobleme zu kombinieren, um sie gleichzeitig in nur einem Modell darstellen zu können.⁵⁾

- 1) Der Meinung Freckners, daß die Unternehmensforschung immer Totaloptima und nicht Partialoptima annehme, kann nicht zugestimmt werden, wenn er sich dabei auf die Gesamtunternehmung bezieht, denn bisher ist es noch nicht gelungen, ein Totaloptimum der Unternehmung zu ermitteln. Vgl. Freckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 70
Vgl. dazu Boulding, K.E. - Spivey, A.W.: Linear Programming and the Theory of the Firm. 2d Printing, New York 1960, S. 162: "It is often stated that Operations Research concerns the 'organisation as a whole', although, in practice, many Operations Research projects and models do not honor this injunction."
- 2) Vgl. Mellerowicz, K.: Unternehmenspolitik, Bd. I, 2. Aufl. Freiburg i.B. 1963, S. 451: "Sie (die Unternehmensforschung - der Verf.) versucht Probleme möglichst unter Beachtung aller für sie wichtigen Einflußfaktoren zu lösen."
- 3) Kosiol, E.: Modellanalyse..., a.a.O., S. 591
- 4) Vgl. Hitch, Ch. - Mc Kean, R.: Suboptimization in Operations Research. In: Operations Research for Management. Vol. I, Hrsg.: Mc Closkey, J.F. - Treffethen, F.N., Baltimore 1954, S. 169 - 186, hier S. 171 und
Kilger, W.: Planungsrechnung ..., a.a.O., S. 56
- 5) Damit widersprechen wir auch der Meinung Käfers, der ausführt, daß die Unternehmensforschung die "Unternehmung grundsätzlich als ein einheitliches Ganzes" betrachtet. Käfer, K.: Betriebswirtschaftliche Verfahrensforschung ..., a.a.O., S. 113.
Unserer Ansicht ist dagegen Kaufmann. Vgl. Kaufmann, A.: Méthodes et Modèles de la Recherche Opérationnelle (Les Mathématiques de l'Entreprise). Bd. I, Paris 1962, S. 16/17

b) Methodik

Methodisch¹⁾ ist die Unternehmensforschung dadurch gekennzeichnet, daß sie versucht, im Wege der Modellbildung ökonomische Entscheidungen als Optimalproblem zu formalisieren und mittels mathematisch, mathematisch-statistischer und logistischer Verfahren zu lösen.²⁾ Dabei läßt sich die Arbeitsmethode der Modellbildung und -lösung - gleichgültig welche Verfahren und Techniken verwendet werden - folgendermaßen schematisch darstellen.^{3) 4)}

(1) Klärende Phase

Dabei sind 3 Dinge zu klären:

- a) Problemstellung
- b) Aufstellung der sogenannten Zielfunktion
- c) Einflußgrößenrechnung⁵⁾ mit Erfassung

-
- 1) "Die Methode ist die Art und Weise, in irgend einem Gebiet vorzugehen, d.h. unsere Tätigkeit zu ordnen, und zwar einem Ziel zuzuordnen." Bochenki, J.M.: Die zeitgenössischen Denkmethoden. Bern 1954. Deutschland: München, 2. Neubearb. Aufl. 1959, S. 16/17
 - 2) Vgl. Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 574
 - 3) Im folgenden in Anlehnung an Zimmermann, H.-J.: Mathematische Entscheidungsforschung und ihre Anwendung auf die Produktionspolitik. Diss. Berlin 1963, S. 13 - 16
 - 4) Allgemeine Ausführungen finden sich bei:
Wittmann, W.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 292
Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung in Wirtschaft und Industrie. Wien - München 1962. Dt.: W. Riedler, S. 32/33
Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 21 - 24
Böhm, H.-H.: Operationenforschung - Moderne Vorbereitung unternehmerischer Entscheidungen. Berlin 1961, S. 20 - 23
 - 5) Vgl. Wuttke, K.W.: Kosten-Einflußgrößenrechnung. In: ZfB 1958 (28), S. 385 - 396

- aa) der zu berücksichtigenden Faktoren im eigenen Bereich;
- bb) der Einflüsse anderer Bereiche;
- cc) des Umfangs der erreichbaren Information im Verhältnis zur notwendigen Information;
- dd) der Sicherheit der Information;¹⁾ (evtl. Angabe von statistischen Sicherheiten, Standardabweichungen ...);
- ee) der Häufigkeit des zu untersuchenden Problems;
- ff) der Quantifizierbarkeit der in Betracht zu ziehenden Faktoren.

Nach der Beantwortung dieser Fragen können wir gewöhnlich über die Möglichkeit der Bearbeitung und der wirtschaftlichen Vertretbarkeit ein abschließendes Urteil abgeben. Bejahen wir die Anwendungsmöglichkeit, so folgt:

(2) Die Phase des Modellbaus

- a) Die Klärung der zu verwendenden Theorien
- b) Die Aufstellung des Modells.

Es soll vollständig, gültig und brauchbar für den jeweiligen Zweck sein; alle wesentlichen Relationen sollen enthalten und mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand berechenbar sein. Das Abwägen zwischen wesentlichen und unwesentlichen Einflüssen ist dabei die große Kunst des Modellbauens;²⁾ denn "toute science est nécessairement schématique et approximative. Toute science est un compromis entre le souci de simplicité et le souci de ressemblance. Une grande simplicité est commode, mais elle risque de ne pas donner une image suffisamment ressemblante des faits; une ressemblance trop poussée

1) Vgl. Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 19 - 26

2) Vgl. Fourastié, J.: Die große Hoffnung des 20. Jahrhunderts. Vorwort in deutscher Übersetzung von B. Lutz. Köln 1954, Vorwort des Übersetzers, S. 13

rend le modèle trop complexe et pratiquement inutilisable." ¹⁾ Die Darstellung der komplexen wirtschaftlichen Probleme mit Hilfe von Modellen ²⁾ ³⁾ ist dabei nichts Neues in den Wirtschaftswissenschaften, denn "en réalité comprendre un phénomène, c'est pouvoir en établir un modèle abstrait." ⁴⁾

Auch in der Betriebswirtschaftslehre finden sich Modelle, ⁵⁾ deren ältestes - die Buchhaltung - nach KOSIOL immer noch auf eine vollbefriedigende Lösung harrt. ⁶⁾ Dabei lassen sich Modelle als vereinfachte Abbilder der

-
- 1) Allais, M.: Puissance et dangers de l'utilisation de l'outil mathématique en économique. In: Econometrica 1954 (22), S. 58 - 71, besonders S. 59
 - 2) Vgl. Kromphardt, W. - Henn, R. - Förstner, K.: Lineare Entscheidungsmodelle. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1961, S. 1, mit Hinweisen auf die verschiedensten Modelle in den Wirtschaftswissenschaften.
 - 3) Vgl. Miller, D.W. - Starr, M.K.: Executive Decisions and Operations Research. Englewood Cliffs, N. J. 1960, S. 115. Die meisten Modelle von Operations Research haben noch einen eidetischen Sinn, in Form eines geistig schaubaren, aber nicht sinnlich (bildlich) vorstellbaren Gebildes. Es gibt aber auch Ausnahmen (Lagerhaltung, Warteschlangen). Die Tendenz in den Naturwissenschaften geht dahin, daß ihre wissenschaftlichen Aussagen überhaupt keinen eidetischen Sinn mehr besitzen, sondern nur noch einen operativen.
Vgl. Bochénski, J.M.: a.a.O., S. 46/47.
Ein eidetischer Sinn eines Zeichens ist dann gegeben, wenn wir innerhalb eines Systems die Zuordnungsregeln zu einem Gemeinten kennen; sein operativer Sinn besteht dagegen in den syntaktischen Regeln, in seinen Beziehungen zu anderen Zeichen desselben Systems.
Vgl. Kade, G.: Die logischen Grundlagen der mathematischen Wirtschaftstheorie als Methodenproblem der theoretischen Ökonomik. Berlin 1958, S. 163
 - 4) Allais, M.: a.a.O., S. 61
 - 5) Vgl. Wenke, K.: Mathematische Modelle in der Betriebswirtschaft. In: ZfB 1956 (26), S. 48 - 53
 - 6) Vgl. Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 322/23

Wirklichkeit,¹⁾ als gedankliche Hilfsmittel zur übersichtlichen Darstellung von unanschaulichen Objekten und komplexen Vorgängen bezeichnen.²⁾ Sie stellen nur eine Approximation der wirtschaftlichen Wirklichkeit dar,³⁾ und müssen sich darauf beschränken, aus der Totalinterdependenz der Wirklichkeit abgegrenzte und überschaubare Teilzusammenhänge auszugliedern.⁴⁾ 5) Bei der Unterscheidung der verschiedenen Modelle kann man nach der Art der Darstellung zwischen bildhaften, analogen und formalen - in verbale und mathematische unterteilt⁶⁾ - Modellen unterscheiden.⁷⁾

Von der Aufgabe her läßt sich in Erklärungs-, Verifikations- und Entscheidungsmodelle einteilen,⁸⁾ wobei für

1) Vgl. Frey, G.: Symbolische und ikonische Modelle. In: The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences. Hrsg.: Freudenthal, H., Dordrecht 1961, S. 89 - 97, hier S. 89

2) Vgl. Bonhoeffer, K.F.: Über physikalisch-chemische Modelle von Lebensvorgängen. Berlin 1948, S. 3

3) Vgl. Förstner, K.: Bemerkungen zur Wirtschaftsmechanik. In: ZfB 1959 (29), S. 38 - 48, hier S. 38

4) Vgl. Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 319

5) Über Sinn und Zweck der Anwendung von Modellen vergleiche Apostel, L.: Towards the Formal Study of Models in the Non-Formal Sciences. In: The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences. Hrsg.: Freudenthal, H., Dordrecht 1961, S. 1 - 37

6) Vgl. Frenckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 72

7) Vgl. Buffa, E.S.: Models for Production and Operations Management. New York - London 1963: "Models may be classified as iconic, analogue and symbolic" (S. 10)

8) Vgl. Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 15 - 19.

Ähnlich Frenckner, der zwischen Erklärungs- (descriptions models) und Entscheidungsmodellen (decision models) unterscheidet. Vgl. Frenckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 71/72

uns nur die Entscheidungsmodelle von Bedeutung sind.¹⁾
Letztere unterscheiden wir nach ihrer formalen Struktur unter Berücksichtigung des Zeitfaktors in:²⁾

- aa) statische und dynamische - unter Umständen in komparativ-statische - wobei wir bei den dynamischen bei unterschiedlicher zeitlicher Änderung des betrieblichen Prozesses noch von diskontinuierlichen und kontinuierlichen dynamischen Modellen sprechen können. Die zeitabhängigen Größen eines diskontinuierlichen Modells werden innerhalb der einzelnen finitesimalen Zeitintervalle als konstant betrachtet, während sich beim kontinuierlichen Modell die Größen stetig mit der Zeit ändern.³⁾ Die stetigen Änderungsprozesse sind in der betrieblichen Praxis sehr schwierig oder

1) Hier muß noch auf eine Unterscheidung nach Kosiol hingewiesen werden, der bei den mathematischen Modellen hinsichtlich des Entscheidungsgehalts unterteilt in Ermittlungs- und Alternativmodelle, wobei man die Ermittlungsmodelle nur indirekt zur Entscheidung verwendet, indem man etwa den Monatserfolg einer Abteilung oder den Kapitalwert einer Investition zu einer Entscheidung benutzt. Die Alternativmodelle nach Kosiol - nicht dem Begriff Angermanns entsprechend - ermitteln dagegen aus einem im Modell enthaltenen Variationsbereich eine oder mehrere Größen, die nach einem vorgegebenen Kriterium eine bestimmte Alternative herausgreifen, die sogenannte optimale Lösung des Kalkülsystems. Vgl. Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 322.

Kritisch hierzu läßt sich anführen, daß bei dem Alternativmodell der ganze Rechengang - als Entscheidungsvorbereitung - näher bei der eigentlichen Entscheidung liegt - verglichen mit dem Ermittlungsmodell - daß aber die Entscheidung selbst unabhängig vom Ergebnis fallen kann; der Name Entscheidungsmodell ist also insgesamt etwas irreführend, denn die Entscheidung wird letztlich nur vorbereitet.

2) Vgl. Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 35 - 37 und

Kaufmann, A.: a.a.O., Bd. 1, S. 17/18

3) Vgl. Angermann, A.: a.a.O., S. 36/37

überhaupt nicht zu erfassen und sollen deshalb im weiteren außer Betracht gelassen werden.¹⁾

- bb) Die Bestimmtheit der Modelldaten läßt uns unterscheiden zwischen deterministischen und stochastischen Modellen, wobei beim deterministischen die abhängigen Variablen als bekannt gelten, d.h. das auf eindeutigen Erwartungen beruhende Modell ist zu jedem Zeitpunkt bzw. Zeitraum kausal interpretierbar.²⁾ Beim stochastischen Modell³⁾ gelten gewisse in das Modell eingehende Variable als unsicher, d.h. die Variablen können verschiedene Werte mit den ihnen zukommenden Wahrscheinlichkeiten annehmen,⁴⁾ - es wird also mit nicht eindeutigen Erwartungen operiert - wobei hierbei unterstellt werden muß, daß die Erwartungen überhaupt quantifizierbar sind. Das stochastische Modell ist ebenfalls kausal interpretierbar, allerdings mit der Einschränkung, daß die situationsbezogenen Zustände des Systems nur bis auf statistische Wahrscheinlichkeiten⁵⁾ kontrollierbar sind.⁶⁾

1) Vgl. Angermann, A.: a.a.O., S. 36/37

2) Vgl. Förstner, K.: Bemerkungen zur Wirtschaftsmechanik. In: ZfB 1959 (29), S. 40/41

3) Über die Entstehung und Bedeutung des Wortes "Stochastik" vergleiche: Erklärungen über Stochastik. In: Ufo 1958 (2), S. 44/45. "Die Stochastik ist nicht sowohl Wahrscheinlichkeitstheorie schlechthin, als vielmehr Wahrscheinlichkeitstheorie in ihrer Anwendung, sei es auf empirische Vielheiten überhaupt, sei es auf empirische Vielheiten einer bestimmten Art."

4) Vgl. Anderson, O.: Probleme der statistischen Methodenlehre in den Sozialwissenschaften. 5. Aufl., Würzburg 1965, S. 90/91

5) Das Wort "Wahrscheinlichkeit" hat 2 Bedeutungen: Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses und Wahrscheinlichkeit einer Hypothese (bzw. eines Gesetzes oder einer Theorie). Der wesentliche Unterschied der beiden Begriffe besteht darin, daß sich die erste Wahr-

Fortsetzung siehe Seite 23

6) Fußnote siehe Seite 23

- cc) Nach der Art der Aufgabenstellung und den Lösungsbedingungen unterscheidet ANGERMANN zwei weitere Modelltypen, die er als Input-Output- und als Extrema-Modelle bezeichnet und weiter unterteilt.¹⁾ Auf diese weitere Aufteilung soll hier aber verzichtet werden, da wir uns im folgenden nicht der Gliederung Angermanns bedienen wollen. Mit seiner neuen Einteilung hat er aber versucht, die vielfältigen Problemgruppen wenigstens klassifizierend zusammenzufassen, wenn ihm dies auch, nach eigenen Aussagen, nicht vollständig gelungen ist.²⁾ - Siehe Skizze (S. 24)

5) Fortsetzung von Seite 22:

scheinlichkeit, wenigstens prinzipiell, zahlenmäßig fassen läßt. Dagegen läßt sich die Wahrscheinlichkeit einer Hypothese nicht zahlenmäßig bestimmen. Die erste Art der Wahrscheinlichkeit wird deshalb gewöhnlich "numerische", "mathematische" oder "statistische" genannt, die zweite dagegen heißt "Annehmbarkeit" (acceptability) oder "Glaubwürdigkeit" (credibility). Vgl. Bochenski, J.M.: a.a.O., S. 125. Über den mathematischen und statistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff vgl. Kreyszig, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen. Göttingen 1965, S. 55 - 65

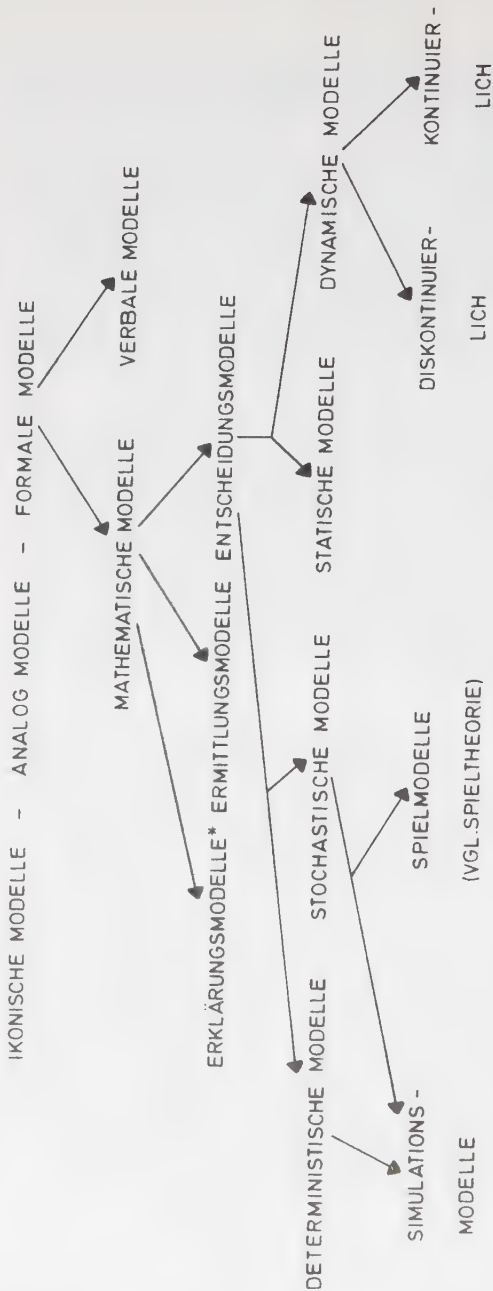
6) Fußnote von Seite 22:

Vgl. Schmidt, K.-U.: Beitrag zur Theorie der Entscheidungsmodelle. Diss. Heidelberg 1960, S. 13. Er teilt in einstufige Entscheidungsmodelle oder einfach in Entscheidungsmodelle und Entscheidungsprozesse ein, wobei er die Bestimmtheit der Daten in "Certainty", "Risk" und "Uncertainty" aufgliedert, woraus sich dann auch die Modelleinteilungen ergeben.

1) Vgl. Angermann, A.: a.a.O., S. 38 - 42

- 2) Weitere Einteilungen, wie exogene und endogene Faktoren - nach der Art der Außenbeeinflussung der Daten - sollen hier unberücksichtigt bleiben. Die in der Literatur noch angeführten Spiel- und Simulationsmodelle sind ihrem Wesen nach in der angeführten Aufteilung schon erfaßt, werden aber nicht selten ihrer Bedeutung wegen als eigene Gruppe mit Unterteilungen angeführt. Ähnliche Aufteilungen, wie von uns angeführt, finden sich bei Sadowski, W.: Theorie und Methoden der Optimierungsrechnung in der Wirtschaft. Dt.: Müller, M. Übersetzung aus dem Polnischen. Berlin 1963, S. 20/21

Als Zusammenfassung des Gesagten erhalten wir folgende Skizze:



* Zur allgemeinen Tendenz in den Wirtschaftswissenschaften Erklärungsmodelle in Entscheidungsmodelle umzuformen, siehe auch die grundsätzlichen Beiträge von Beckmann, H. J.: Lineares Programmieren und neoklassische Theorie. In: "weltwirtschaftliches Archiv", Band 84, 1960, Seite 39 - 50 sowie: Reichardt, H.: Zur operativen Bedeutung der quantitativen Wirtschaftstheorie. In: Zeitschrift f. o. Gesamte Staatswissenschaft, Band 120, 1964, Seite 666 - 677.

(3) Die dritte Phase, die der Prognose, besteht aus der Erarbeitung möglicher Lösungen. Diese Lösungen werden je nach Art der Modelle - gemeint ist hier der strukturelle Aufbau der Entscheidungsmodelle - mit Hilfe verschiedener mathematischer, statistischer oder formal-logischer Techniken erreicht. Die Bestimmung einer optimalen Lösung wird nicht immer möglich sein. Manchmal sind mehrere gleichwertige oder mehrdeutige Lösungen gegeben, wobei dann der Berücksichtigung nicht quantifizierbarer Einflüsse große Bedeutung zukommt. Im Rahmen der Modelllösung sind weitere Angaben nötig über

- die vorgeschlagenen Maßnahmen,
- die Wirkungen dieser Maßnahmen auf den vom Modell erfaßten Bereich und die Nebengebiete,
- die in der Lösung eingeschlossenen Risiken,
- die nicht quantifizierten Einflüsse, die im Modell nicht erfaßt sind.¹⁾

Die allgemeinen Lösungstechniken lassen sich in drei Gruppen einteilen:²⁾ das analytische,³⁾ das numerisch-iterative und das Monte-Carlo-Verfahren. Analytische Verfahren sind im wesentlichen deduktiv, während es sich beim numerisch-iterativen Verfahren um ein induktives Verfahren handelt. Dabei werden die Symbole des Modells durch Zahlen ersetzt, und man versucht durch systematisches Probieren - Iteration genannt - zu einer Lösung zu

1) Vgl. Zimmermann, H.J.: Mathematische Entscheidungsforschung und ihre Anwendung auf die Produktionspolitik. Diss. Berlin 1963, S. 15

2) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 161
Manche Autoren unterscheiden auch zwischen analytischer Lösungsmethode und Simulation. Vgl. Wiese, K.-H.: Mathematische Simulationsverfahren. In: IBM-Form 78102 10.63, S. 2/3

3) Beim analytischen Lösungsverfahren haben wir am Schluß nur einen formelmäßigen Ausdruck stehen, der das Ergebnis ergibt. Vgl. Lagerhaltungsmodelle

kommen. In manchen Fällen ist keines dieser Verfahren anwendbar, bevor nicht ein Ausdruck der Gleichung mit Hilfe der sogenannten Monte-Carlo-Methode ausgewertet ist. Die Monte-Carlo-Methode¹⁾ ist ein Verfahren, mit dem wir mathematische Ausdrücke, die aus einer oder mehreren Verteilungsfunktionen aufgebaut sind und aus irgend einem Grund praktisch nicht oder schwierig bestimmbar sind, näherungsweise errechnen. Man verwendet dazu das Konzept der reinen Zufallsstichprobe, wobei unter Zugrundelegung des zu berechnenden Systems dieses mit Hilfe von Zufallszahlen durchgespielt - simuliert - wird.²⁾ Es wird dabei versucht, "irgendeine wahrscheinlichkeitstheoretische Eigenschaft einer Gesamtheit von Gegenständen (objects³⁾, der Verf.) oder Ereignissen durch die Anwendung der Zufallsstichprobe auf die Komponenten dieser Gegenstände oder Ereignisse zu bestimmen."⁴⁾ Hinzuzufügen bleibt noch, daß der Modellaufbau und die Modelllösung gewöhnlich von einem Team von Wissenschaftlern vorgenommen wird. In der Synthese aller Erkenntnisse der verschiedenen Wissenschaften ergibt sich nicht selten schon ein Vorteil gegenüber den üblichen Arbeitsweisen.

1) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 166/67 und Kromphardt, W. - Henn, R. - Förstner, K.: a.a.O., S. 419 - 423

2) Vgl. unser praktisches Beispiel: Transportplanung (Teil 2/D/III/4) und das Beispiel bei Munz, Max: Die Monte-Carlo-Methode - ein neues Planungsverfahren für den Handelsbetrieb. In: ZfhF (NF) 1959 (11), S. 615 - 623

3) Der englische Ausdruck "objects" gibt einen besseren Überblick und ist mit Gegenständen nur unvollständig wiedergegeben. Vgl. Churchman, C.W. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Introduction to Operations Research. New York 1957, S. 175

4) Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations Research ..., a.a.O., S. 167

Nicht von ungefähr sind die neuen Verfahren erst entwickelt worden, als es mit Hilfe moderner elektronischer Rechenanlagen¹⁾ gelungen war, den notwendigen Zeitaufwand in vernünftigen Grenzen zu halten. So nimmt etwa die Lösung einer Linear-Programming-Aufgabe mit $m = 20$ Nebenbedingungen, $n = 50$ Veränderlichen (einschließlich von 20 Schlupfvariablen) und 24 Iterationsschritten N nach einer Faustregel von WIEZORKE²⁾ etwa 520 Std. (65 Arbeitstage à 8 Std.) - selbst bei Verwendung einer elektrischen Tischrechenmaschine - in Anspruch. Die gleiche Arbeit kann von einer IBM 650 nach Angaben von WALTHER³⁾ - allerdings ohne die Zeiten für Programmie-

- 1) Man unterscheidet zwischen Analog- und Digitalrechnern, wobei sich erstere für kommerzielle Probleme nicht so gut eignen. Vgl. Müller, H.: Die elektronische digitale Rechenmaschine und Grundlagen ihrer Anwendbarkeit unter besonderer Berücksichtigung betriebswirtschaftlichen Aufgabenstellungen. Berlin 1959, S. 37.

Außerdem Neumann, Th.: Der elektronische Analogrechner als Hilfsmittel bei der Lösung betriebswirtschaftlicher Probleme, dargestellt am Beispiel der Optimierungs- und Simulationsprobleme. Diss. München 1964, S. 34 - 38 sowie

Billeter, E.P.: Der praktische Einsatz elektronischer Rechenautomaten. 2. verb. Aufl. Wien 1964, S. 24

- 2) Vgl. Wiezorke, B.: Ein weiteres Rechenschema für die Simplexmethode. In: Ufo 1961 (5), S. 166 - 171, hier S. 171 nach der Formel:

$$T \text{ (Std.)} = \frac{(m+1) \cdot (n+1,5)}{50} \times N$$

Nach einer Faustregel beträgt die Anzahl der Iterationen N zwischen

$$1,5 m \leq N \leq 2 m$$

der vorhandenen Nebenbedingungen (Restriktionen) m . Vgl. Arnoff, E.L. - Sengupta, S.S.: Mathematical Programming. In: Progress in Operations Research. Vol. 1. Hrsg.: Ackoff, R.L., S. 106 - 210, hier S. 130. New York - London 1961

- 3) Vgl. Walther, A.: Wechselbeziehungen zwischen Rechenautomaten und Operational Research. In: Ablauf- und Planungsforschung 1963 (4), S. 146 - 157, hier S. 153. Es ist klar, daß diese Angaben in der Zwischenzeit durch Computer mit höheren Rechengeschwindigkeiten, rascherem Speicherzugriff und computergerechteren Verfahren als überholt betrachtet werden können.

rung, Kartenstanzen und Tabellieren - in ca. 36 Minuten erledigt werden.

c) Die Zielsetzung von Operations Research

Das Ziel der Operations-Research-Untersuchungen ist es nicht, qualitative (im numerischen Sinne) Aussagen zu machen - etwa derart: Mit steigenden Verkaufspreisen sinkt der Mengenumsatz; oder der Gesamtgewinn ist an dem Punkt am höchsten, an dem das Steigungsmaß der Gesamterlöskurve gleich der Gesamtkostenkurve ist (Cournot'scher Punkt) - sondern es sollen vielmehr numerisch quantitative Unterlagen über die Zusammenhänge der relevanten Größen erarbeitet werden. Dabei beschäftigt sich Operations Research weniger mit der Entscheidungsvorbereitung für die oberste Führungsebene, als mit der Beschaffung von Unterlagen für das mittlere Management. Das Objekt, das dabei optimiert werden soll - die sogenannte Zielfunktion in Form von Kosten, Erträgen, Deckungsbeiträgen, Zeiten etc. - wird von der obersten Unternehmensführung vorgegeben. Die Festlegung dieser Zielvorstellung, die betriebswirtschaftlich von beträchtlicher Problematik sein kann, wird von Seiten der operationsanalytischen Betrachtung als problemlos gegeben betrachtet. Schwierigkeiten können sich dabei trotzdem dadurch ergeben, daß an schwer quantifizierbaren Stellen sogenannte "measures of effectiveness" festgelegt werden müssen.¹⁾

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit Operations Research nicht bereits Entscheidungen getroffen, sondern Unterlagen für die Entscheidungsvorbereitung beschafft werden.²⁾ Mit Hilfe von Operations Research

1) Vgl. Wittmann, W.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 287

2) Vgl. Böhm, H.-H.: Operationenforschung ..., a.a.O., S. 14. Er umschreibt diesen Wesenszug mit dem etwas unhandlichen, aber bezeichnenden Begriff: "Entscheidungs-Vorbereitungs-Forschung"

soll die Intuition objektiviert werden.¹⁾

3. Begriff

Nachdem wir oben versucht haben, Wesen und Zielsetzung von Operations Research darzustellen, wollen wir noch einen kurzen Blick auf die Versuche der Literatur werfen, Operations Research in Form von Definitionen zu umschreiben.

FAURE, BOSS, LE GARFF definieren Operations Research als "die Gesamtheit der zur wissenschaftlichen Analyse von Organisationsphänomenen herangezogenen Methoden",²⁾ wobei sie unter Organisationsphänomenen in Anlehnung an KAUFMANN³⁾ gewisse Vorgänge und Zustände bezeichnen, wie sie bei tätigen Beziehungen zwischen Menschen, Produkten und Maschinen auftreten. Ähnlich lautet - wie sie sagen - die provisorische Arbeitsdefinition von CHURCHMAN, ACKOFF, ARNOFF:⁴⁾ "Operations Research ist die Anwendung wissenschaftlicher Methoden, Verfahren und Hilfsmittel auf Probleme, betreffend die Arbeitsweise von Systemen mit dem Ziele, den für diese Arbeitsweise Verantwortlichen optimale Lösungen für diese Probleme zu liefern," wobei hier mit Systemen besonders die Mensch-Maschinen-Systeme in der industriellen Organisation gemeint sind. Als unzureichend empfinden wir die Definition von VAZSONYI:⁵⁾ "Die Disposition über beschränkte Mittel, um bestimmte Ziele auf die beste Art zu erreichen, ist in

1) Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 20

2) Faure, R. - Boss, J.-P. - Le Garff, A.: a.a.O., S. 9

3) Kaufmann, A.: a.a.O., Bd. 1, S. 4: "... nous utiliserons le vocable phénomène d'organisation chaque fois qu'il s'agira d'ensembles actifs réunissant des hommes, des machines et des produits, sous leurs formes concrètes ou abstraites."

4) Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 26

5) Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 19

groben Zügen Definition der wissenschaftlichen Planungsrechnung."

Am treffendsten scheint uns die Definition MÜLLER-MERBACHS¹⁾ zu sein, die alle von uns gebrachten Wesensmerkmale umfaßt: "Unter Operations Research versteht man die Anwendung mathematischer, mathematisch-statistischer und logistischer Methoden zur analytischen Quantifizierung von Zusammenhängen zwecks Unterlagenbeschaffung für die optimalen Unternehmensentscheidungen", wobei unter Unternehmensentscheidungen allgemein das Tun und Handeln, das "Unternehmen" verstanden wird. Kritisch läßt sich hierbei auf die Gefahr von Verwechslungen des Begriffes "Unternehmensentscheidungen" hinweisen sowie auf die Möglichkeit, nicht nur analytisch, sondern auch numerisch-iterativ und unter Umständen mit der Monte-Carlo-Methode Zusammenhänge zu berechnen.²⁾

III. Gebiete des Operations Research

1. Überblick

Operations Research ist eine Sammelbezeichnung für recht heterogene Dinge. Daher fehlt es neben einer treffenden Definition auch an einer geeigneten Einteilung und Unterteilung, um in einem theoretischen Überbau möglichst alle Verfahren, Methoden und Techniken erfassen zu können. Der Blick in die Literatur gibt - von wenigen Bemü-

1) Müller-Merbach, H.: Operations Research als Optimalplanung. In: ZfhF (NF) 1963 (15), S. 191 - 206, hier S. 196

2) Das Ringen um die Bestimmung und die Namensgebung von Operations Research zeigt auch ein in der Zeitschrift "Operational Research Quarterly" auszugsweise wiedergegebener Schriftwechsel zwischen McCloskey und Swan. Vgl. The Name and the Nature of Operations Research - A Correspondence. In: Operat. Res. Quarterly 1957 (8), S. 1 - 5

hungen abgesehen - auch keinen Aufschluß über ein bestimmtes Einteilungskriterium, wobei vor allem in der amerikanischen Literatur im allgemeinen die Anwendung vor der Systematik rangiert. Von der Einteilung CHURCHMAN, ACKOFF, ARNOFF ausgehend, haben wir versucht, die neuesten Entwicklungen und Verfahren zu berücksichtigen und darzustellen, wobei sich aber im einzelnen und im Hinblick auf den praktischen Teil dieser Arbeit verschiedene sprachliche und technische Abgrenzungsfragen ergeben haben.

Wenn wir etwa den ersten Komplex mit "Mathematischer Programmierung" überschreiben, so sind wir uns darüber im klaren, daß sich dahinter recht unterschiedliche Probleme verbergen, die, und das ist bemerkenswert, relativ gleiche mathematische Strukturen besitzen. Des weiteren werden wir - der Vollständigkeit halber - die Spieltheorie und die Verfahren der Netzplantechnik nur kurz umreißen. Für die Spieltheorie können wir uns innerhalb der Fertigung kein praktisches Anwendungsbeispiel vorstellen, während es sich bei der sogenannten Netzplantechnik um ein Verfahren handelt, das unabhängig von Branche und Funktionsbereich bei Vorliegen einer bestimmten Grundstruktur immer anwendbar ist. Als praktisches Anwendungsbeispiel im Falle der Glasfabrik wäre die Verwendung bei der Planung der in Abständen von 4 - 5 Jahren stattfindenden Wannenreparatur denkbar. Da die Behandlung dieses Beispiels¹⁾ den Zweck und Rahmen dieser Arbeit weit übersteigen würde, soll die Anwendbarkeit unbelegt unterstellt, auf eine praktische Darstellung aber im Einzelfall verzichtet werden.

Experimentelle Methoden - Simulation und Planspiel - könnten für einzelne Probleme der Glasfabrik Anwendung

1) Es handelt sich hierbei im wesentlichen um technische Probleme, die allenfalls unter Zeit-Kosten-Gesichtspunkten für uns von Interesse sein können.

finden. Allerdings fehlen uns für eine sinnvolle Darstellung die technischen Voraussetzungen (Computer), so daß auch diese Verfahren aus der praktischen Behandlung ausgeschlossen werden müssen. Im theoretischen Überblick wollen wir sie aber kurz darstellen.

2. Mathematische Programmierung¹⁾ (Mathematical Programming)

Die "Mathematische Programmierung" unterteilen wir in die sogenannte "Lineare Optimierung"²⁾ (Linear Programming), "Nichtlineare Optimierung" (Nonlinear Programming) und eine Anzahl Sonderfälle.

a) Lineares Optimieren

"Linear Programming", wie es im angelsächsischen Sprachbereich und auch hier in Deutschland nicht selten genannt wird, ist die Grundform der "Mathematischen Programmierung" und gleichzeitig das am weitesten und be-

1) Wenn wir hier von "Programmierung" in Verbindung mit mathematischen Verfahren sprechen, müssen wir weitere, gänzlich verschiedene Bedeutungen dieses Wortes unterscheiden:

- a) Die Aufstellung und Formulierung von Prozeß- und Ablaufplänen zur selbsttätigen Regelung bzw. Steuerung von Maschinen. Vgl. dazu Thüring, B.: Einführung in die Methoden der Programmierung. Baden-Baden 1957, S. 63. Thüring erläutert im Rahmen dieser Programmierungsart auch lineare Programme, die mit unserer "Linearen Programmierung" nichts zu tun haben.
- b) Mit dem Begriff "Programmierung" wird auch noch die Übertragung von bestimmten logischen Operationen in die Sprache elektronischer Rechenanlagen verstanden. Vgl. Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 165, Fußnote 156

2) Linear Programming soll mit linearer Optimierung übersetzt werden. Außerdem verwenden wir noch die übliche Abkürzung L.P. für Linear Programming.

sten entwickelte "Werkzeug des Operations Research"¹⁾.
Genauer wäre es, dieses Linear Programming als lineares, statisches Optimieren unter Sicherheit mit vollständiger Teilbarkeit der Faktoren, d.h. Wegfall der Ganzzahligkeitsbedingung der Lösung zu bezeichnen.²⁾ Das Standardmodell des Linear Programming soll im folgenden zum besseren Verständnis und als Grundlage für weitere Erklärungen der Sonderfälle in mathematisch-formaler Weise und mit den zugrundeliegenden wirtschaftlichen Gegebenheiten kurz dargestellt werden.³⁾

aa) Formaldarstellung des Standardmodells des Linear Programming

Die mathematische Definition ist einfach, wie DORFMAN, SAMUELSON und SOLOW sagen: "It is the analysis of problems in which a linear function of a number of variables are subject to a number of restraints in the form of

-
- 1) Ferguson, R.O. - Sargent, L.F.: Linear Programming: Fundamentals and Applications. New York - Toronto - London 1958, S. 7
 - 2) Vgl. Zimmermann, H.-J.: Mathematische ..., a.a.O., S. 19
 - 3) Die Literatur über Linear Programming ist schon außerordentlich umfangreich. Allerdings fehlen nahezu völlig Angaben über die Schwierigkeiten bei der praktischen Durchführung. Die Literatur beschränkt sich - von wenigen Ausnahmen abgesehen - ausschließlich auf die Behandlung der mathematischen Grundtatbestände und der Darstellung der verschiedenen Lösungsmethoden anhand fiktiver Beispiele. Grundlegende Werke sind:
Dantzig, G.B.: Lineare ..., a.a.O.;
Reinfeld, N.V. - Vogel, W.R.: Mathematical Programming. Englewood Cliffs N.J. 1958;
Ferguson, R.O. - Sargent, L.F.: a.a.O.;
Gass, S.J.: Linear Programming. Methods and Applications. New York - Toronto - London 1958;
Beckmann, M.J.: Lineare Planungsrechnung - Linear Programming. Ludwigshafen a.Rh. 1959;
Kreko, B.: a.a.O.;
Dorfman, R. - Samuelson, P.A. - Solow, R.M.: Linear Programming and Economic Analysis. New York - Toronto - London 1958

linear inequalities."¹⁾ Diese Definition ist zwar vom betriebswirtschaftlichen Standpunkt etwas zu allgemein und unanschaulich, gibt aber den wesentlichen mathematischen Tatbestand wieder. Als Gleichungssystem ergibt sich folgende Form:

Man maximiere die lineare (Ziel-)Funktion

$$(1) \quad \sum_{k=1}^n c_k x_k = \text{Max}$$

unter Einhaltung der m linearen Nebenbedingungen

$$(2) \quad \sum a_{ik} x_k \leq b_i \quad (i = 1, 2 \dots m)$$

und der Vorzeichenbeschränkung

$$(3) \quad x_k \geq 0 \quad (k = 1, 2 \dots n)$$

Das Ungleichungssystem (2) läßt sich ohne weiteres in ein Gleichungssystem umwandeln, indem wir jeweils der linken Seite jeder Ungleichung eine weitere Unbekannte (slack variable) hinzufügen.²⁾ Diese "Schlupfvariablen"³⁾ unterliegen ebenfalls der Nichtnegativitätsbedingung.

$$(4) \quad x_{n+j} \geq 0 \quad (j = 1, 2 \dots m)$$

In Vektorschreibweise lautet die Aufgabe:

$$(5) \quad c^T x = \text{Max}$$

$$(6) \quad Ax \leq b$$

$$(7) \quad x \geq 0$$

Verbal läßt sich das Standardmodell folgendermaßen interpretieren: Das Problem besteht darin, für die Ziel-

1) Dorfman, R. - Samuelson, P. - Solow, R.: Linear Programming ..., a.a.O., S. 8

2) Vgl. Dantzig, G.B.: Lineare ..., a.a.O., S. 68

3) Diese Schlupfvariablen werden auch künstliche oder Scheinvariable genannt. Vgl. Dantzig, G.B.: Lineare ..., a.a.O., S. 119

funktion einen möglichst hohen numerischen Wert zu bestimmen, wobei die c-Koeffizienten konstant sind und nur die einzelnen x-Werte einen extremen Wert anstreben. Wie noch zu zeigen sein wird, ist das zahlenmäßige Verhältnis der Koeffizienten untereinander von besonderer Bedeutung. Die Nebenbedingungen setzen den Variablen durch (6) obere und durch (7) untere Grenzen.¹⁾

Auf die Behandlung theoretisch möglicher Sonderfälle soll hier verzichtet und auf die Literatur²⁾ bzw. auf die Behandlung im praktischen Teil verwiesen werden.³⁾ Ebenso soll hier auf das Problem der Dualität nicht näher eingegangen werden.⁴⁾

bb) Das allgemeine Produktionsmodell als betriebswirtschaftliche Interpretation des Standardmodells^{5) 6)}

In einer Unternehmung können n Produkte (auch Produktarten genannt) hergestellt werden. Dazu sind insgesamt m

1) Bohmer, R.: Die Anwendbarkeit der Linearen Programmierung auf betriebswirtschaftliche Planungsprobleme. Diss. Köln 1963, S. 27

2) Vgl. Zimmermann, W.: Modellanalytische Verfahren zur Bestimmung optimaler Fertigungsprogramme. Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der Operations Research Verfahren im Bereich der Programmplanung. Berlin 1966, S. 29/30, z.B. das Auftreten von negativen Variablen innerhalb des Ungleichungssystems; das Auftreten einer Beschränkung innerhalb eines allgemeinen Systems von Ungleichungen.

3) Vgl. Teil 2/D/II Exkurs

4) Vgl. die praktische Handhabung in Teil 2/E/III/2b

5) Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 33 - 40

6) Zur Problematik der logisch hinreichend begründeten Anwendung des mathematischen Modells auf ein betriebswirtschaftliches Sachproblem vergleiche Zimmermann, W.: Modellanalytische ..., a.a.O., S. 35 - 46 und Marcus, P.: Der ökonomische Inhalt der Linearen Planungsrechnung - dargestellt an Beispielen aus der Energiewirtschaft. Schriftenreihe des Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln. Bd. XII. München 1966, S. 15 - 34

Produktionsfaktoren erforderlich. Es ist nun zu bestimmen, welche Mengen von jeder Produktart zu produzieren sind, um den Gesamtgewinn dieser Unternehmung innerhalb einer bestimmten Planungsperiode so groß wie möglich zu machen. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß

- die einzelnen Produktarten unterschiedliche Gewinne erzielen,
- alle oder einige der Produktionsfaktoren nur in bestimmten Mengen zur Verfügung stehen und
- zur Produktion der einzelnen Produkte unterschiedliche Produktionsfaktoren mit verschiedenen Mengen erforderlich sind.

Als Linear-Programming-Modell formuliert ergibt sich bei den Definitionen

x_k = die gesuchte Menge der k-ten Produktart;

c_k = der Grenzerfolg der k-ten Produktart. Der Grenzerfolg c errechnet sich aus der Differenz von Stückpreis p_k und den variablen Kosten k_v , wobei beide für die jeweilige Produktart als konstant angenommen werden. Dieser Berechnung liegt die Konzeption des Direct Costing¹⁾ zugrunde. Die fixen Kosten bleiben dabei unberücksichtigt, da sie keinen Einfluß auf die Struktur der Lösung besitzen.

b_i = die Menge des zur Verfügung stehenden i-ten Produktionsfaktors,

1) Heine, P.: Direct Costing - eine anglo-amerikanische Teilkostenrechnung. In: ZfhF (NF) 1959 (11), S. 515 - 534, hier S. 519. c ist hier und nach Direct Costing "der Unterschied zwischen den Erlösen aus den verkauften Erzeugnismengen und den für die verkauften Mengen aufgewendeten variablen Kosten." Nimmt man an, daß p_k und k_v linear von x_k abhängig sind, dann ist $c_k = (p_k - k_v) = \text{konstant}$ (S. 518).

a_{ik} = die Anzahl der Einheiten des i -ten Produktionsfaktors, welche zur Erzeugung einer Einheit der k -ten Produktart erforderlich sind,

n = die Anzahl der erstellbaren Produktarten,

m = die Anzahl der zur Verfügung stehenden Produktionsfaktoren

folgender, dem Standardmodell des Linear Programming äquivalenter Ansatz

$$(8) \sum_k c_k x_k = \text{Max} \quad (k = 1 \dots n)$$

$$(9) x_k \geq 0 \quad (k = 1 \dots n)$$

$$(10) a_{ik} x_k \leq b_i \quad (i = 1 \dots m)$$

Als Lösung erhalten wir unter bestimmten Voraussetzungen, die im folgenden noch ausgeführt werden sollen:

- (1) den Gesamtgrenzerfolg der Unternehmung als Maximum der Zielfunktion;
- (2) diejenigen Mengen der einzelnen Produktarten, die zur Realisierung des Gewinnmaximums notwendig sind.

Ziehen wir vom Gesamtgrenzerfolg der Unternehmung die gesamten fixen Kosten (K) - als beschäftigungsunabhängige Kosten definiert - ab, so erhalten wir den sogenannten Netto- oder Reingewinn bzw. unter Umständen einen Verlust. Die etwas erweiterte Zielfunktion würde dann lauten:

$$(8a) c_k x_k - K \Rightarrow \text{Max}$$

Die Nichtnegativitätsbedingung zeigt hier auch ihre betriebswirtschaftliche Bedeutung. Wäre sie nicht vorhanden, so könnte z.B. eine Produktart x_k mit relativ kleinem Grenzerfolg mit großen negativen Werten und damit betriebswirtschaftlich undenkbaren Lösungen angegeben werden, damit andere Produktarten mit relativ hohen Grenzerfolgen (Stückgewinnen) in der Lösung um so größer werden könnten.

Durch Variation des Standardmodells ergeben sich drei weitere Modelltypen, die in der Literatur als Transport-, Zuweisungs-, (assignment model) und Mischungsmodell bekannt geworden sind.¹⁾ Unter ähnlichen mathemati-

1) Beispiele in der Literatur finden sich für:

Transport-Modelle: Dantzig, G.: a.a.O., S. 42 - 49, S. 343 - 360,
Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: Methoden und Probleme der Unternehmensforschung - Operations Research. Dt.: Künzi, H.F., Würzburg 1962, S. 205 - 226,
Joksch, H.C.: Lineares Programmieren, Tübingen 1962, S. 152 - 156,
Reinfeld, N.V. - Vogel, W.R.: Mathematical Programming. Englewood Cliffs, N.J. 1958, S. 11 - 24,
Danø, Sven: Linear Programming in Industry - Theory and Application. Wien - New York 1965, S. 61 - 65,
Gass, S.J.: Linear Programming. Methods and Applications. New York - Toronto - London 1958, S. 137 - 156,
Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 260 - 274

Beim Transportmodell lassen sich verschiedene Unterprobleme unterscheiden:

- Transportprobleme mit nichtkonstanten Kosten pro Transporteinheit,
- Transportprobleme mit Kapazitätsbeschränkungen,
- das sogenannte Transshipment Problem,
- Multi-Index-Transportprobleme,
- Multistage Transportation Problems mit dem sogenannten

- (1) Caterer Problem
- (2) Warehouse Problem
- (3) Production Smoothing Problem.

Vgl. dazu im einzelnen Arnoff, E.L. - Sengupta, S.S.: Mathematical Programming. In: Progress in Operations Research. Vol. 1. Hrsg.: Ackoff, R.L. New York - London 1961. S. 106 - 210, hier besonders S. 133 - 149

Zuweisungsmodelle: Dantzig, G.B.: a.a.O., S. 361 - 381,
Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 195 - 205;
Joksch, C.H.: a.a.O., S. 157 - 159,
Angermann, A.: a.a.O., S. 150 - 164,
Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 314 - 336

Fortsetzung siehe Seite 39

schen Strukturen verbergen sich betriebswirtschaftlich ganz verschiedene Sachverhalte. Zur sprachlichen Abgrenzung kann gesagt werden, daß die gesamten Linear-Programming-Modelle auch als Ver- oder Zuteilungsmodelle (allocation models) bezeichnet werden. Dies kann zu Verwechslungen gegenüber den Zuweisungsmodellen (assignment models) führen, um so mehr, als die deutschen Übersetzungen nicht immer im gleichen Sinne gebraucht werden. Bei der Vielzahl der Lösungsmöglichkeiten müssen wir im einzelnen ebenfalls auf die Literatur verweisen.¹⁾ Die Darstellung dieser oft sehr speziellen Verfahren würde den Rahmen dieser Arbeit zu sehr ausweiten. Im übrigen finden einige - neben der Simplexmethode - bei der Behandlung der praktischen Beispiele Verwendung, so daß auch darauf verwiesen werden kann.

cc) Die Voraussetzungen des Produktionsmodells²⁾

Ein betriebswirtschaftliches Planungsproblem kann mit Linear Programming gelöst werden, wenn sich das Problem als Linear Programming-Modell formulieren und sich für

1) Fortsetzung von Seite 38:

Mischungsmodelle: Dantzig, G.B.: a.a.O., S. 50 - 62,
Woitschach, M. - Wenzel, G.: Lineare Planungsrechnung in der Praxis. Linear Programming. Stuttgart o.J., S. 7 - 42,
Scholl, E.: Die lineare Planungsrechnung unter besonderer Berücksichtigung linearer Verteilungsmodelle. Diss. Mannheim 1959, S. 8/9,
Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 21 und S. 83 - 86,
Danø, S.: a.a.O., S. 33 - 52

Wohl das bekannteste Mischungsproblem ist das von Cornfield, J., 1940 formulierte und von Stigler 1945 gelöste sogenannte Diätproblem.

- 1) Vgl. Dantzig, G.B.: a.a.O.; Scholl, E.: a.a.O.; Jöksch, H.C.: a.a.O.; Gass, S.J.: a.a.O.; Angermann, A.: a.a.O.; Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 21 - 32
- 2) Über Einzelheiten vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 96 - 209

das formulierte Linear Programming-Modell eine Lösung bestimmen läßt. Letzteres soll in unserem Fall unterstellt werden. Bei der Formulierung des Linear Programming-Modells wird wiederum angenommen, daß

- die Voraussetzungen als Entscheidungsmodell erfüllt sind - was im allgemeinen gegeben ist - und daß weiter
- die Voraussetzungen, die sich aus dem mathematischen Modell ergeben, erfüllt sind: Die Voraussetzungen verträglicher Gleichungen und endlicher Lösungen, sind bei sinnvollen betriebswirtschaftlichen Problemen, die ohne Widersprüche formuliert worden sind, stets erfüllt.¹⁾ Ebenso die Voraussetzungen der Nichtnegativität, da negative Werte betriebswirtschaftlich unreal sind.²⁾

Die Voraussetzungen

- der Quantifizierung der Einflußgrößen,
- der Additivität,
- der konstanten Inputdaten,
- der Linearität der Zielfunktion und der Nebenbedingungen

sind mit Ausnahme der Additivität vom betriebswirtschaftlichen Standpunkt her problematisch und bilden den Ansatz für manche Kritik.

Von den recht zahlreichen Erweiterungen³⁾ sei zusammen-

1) Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 100

2) Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 36/37. Negative Produktmengen lassen sich dann in einem betriebswirtschaftlichen Modell sinnvoll formulieren, wenn der betreffende Produktionsprozeß umkehrbar ist. Dies ist aber nicht möglich, da selbst einfache physikalische Mischungsprozesse, wie das Mischen von Sand und Kies, ohne Verlust der zur Mischung aufgewandten Energie nicht umkehrbar ist.

3) Weitere Einzelheiten vgl. bei Bohmer, R.: a.a.O., S. 107 - 207, der diese Erweiterungen vom theoretischen Standpunkt her in einmalig übersichtlicher Weise behandelt.

fassend nur auf Linear Programming-Modelle

- mit zusätzlichen Bedingungen: beschränkte Variable - interdependente Variable - Gleichungen statt Ungleichungen - Ganzzahligkeitsbedingungen - nicht quantitative Nebenbedingungen und
- mit zusätzlichen speziellen mathematischen Größen: fiktive Variable - negative b_i -Werte - M-Koeffizienten¹⁾ - nichtlineare Funktionen, verwiesen.

b) Nichtlineare Optimierung²⁾ und andere Sonderfälle

aa) Non-linear Programming³⁾

Erfüllt eine Zielfunktion oder wenigstens eine der Restriktionen nicht die Bedingung der Linearität, so ist eine Lösung des Problems mit den Methoden des Linear Programming nicht mehr möglich und es bedarf anderer Lösungsverfahren, die bisher nur für eine Anzahl Spezialfälle bestehen.⁴⁾ Ein allgemein gültiges Verfahren existiert noch nicht. Die Probleme, mit denen man sich bisher am meisten beschäftigt hat, sind jene mit linearen Restriktionen und nichtlinearer Zielfunktion gewesen.⁵⁾ Nur für die Fälle, daß sich die Zielfunktion in

1) Mit der Einführung sogenannter M-Werte in der Zielfunktion eines Linear Programming-Modells soll erreicht werden, daß bestimmte Variable in der Lösung auf jeden Fall den Wert Null erhalten.

2) Vgl. insgesamt Künzi, H.P. - Krelle, W.: Nichtlineare Programmierung. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1962 und Hadley, G.: Nonlinear and Dynamic Programming. Reading (Mass.) - Pao Alto - London 1964

3) Ein kurzer geschichtlicher Überblick findet sich bei Hadley, G.: a.a.O., S. 14 - 17

4) Vgl. Wolfe, P.: The Simplex Method for Quadratic Programming. In: Econometrica 1959 (27), S. 382 - 398

5) Vgl. Hadley, G.: a.a.O., S. 4/5 und Künzi, H.-P.: Nichtlineare Programmierung. In: Operations-Research-Verfahren I, Hrsg.: R. Henn. Meisenheim/Glan 1963, S. 96 - 114 mit der Darstellung der verschiedenen Lösungsverfahren

n-Funktionen

$$z = f(x_1, x_2 \dots x_n) = f_1(x_1) + f_2(x_2) \cdot \dots f_n(x_n)$$

aufteilen läßt, und daß die Zielfunktion in der Form:

$$z = f(x_1, x_2 \dots x_n) = \sum_{j=1}^n c_j x_j + \sum_{i=1}^n \cdot \sum_{j=1}^n d_{jj} x_j \cdot x_j$$

- d.h. Auflösung in einen linearen und einen quadratischen Teil - darstellbar ist, lassen sich bei Einführung zusätzlicher Restriktionen optimale Lösungen garantieren.

Bei nichtlinearen Restriktionen ist es von besonderer Bedeutung, ob es sich dabei um konkave oder konvexe Funktionen¹⁾ handelt, da besonders die Lösung konkaver Funktionen Schwierigkeiten bereitet.

Für eine praktische Behandlung im ökonomischen Bereich genügt es aber oft, die nichtlinearen Funktionen durch lineare zu approximieren, indem man etwa die ursprüngliche Kurve durch Treppenkurven oder durch lineare, auf kleinere Bereiche beschränkte Kurven ersetzt.²⁾ Allgemein läßt sich feststellen, daß eigens entwickelte Lösungsverfahren immer noch die besten Ergebnisse geliefert haben, und allgemein gültige "Kochrezepte" hier noch nicht möglich sind.³⁾

bb) Stochastische Optimierung

Beim stochastischen linearen Optimieren oder, wie es auch genannt wird, "Programmieren unter Unsicherheit"

-
- 1) Beispiel bei Kulhavy, E.: a.a.O., S. 63 - 65; beachte die unterschiedliche Terminologie bei Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 187
 - 2) Vgl. die Erläuterungen im praktischen Teil, Teil 2/C/I/1
 - 3) Vgl. Stahlknecht, P.: Operations Research-Leitfaden für den Praktiker. Braunschweig 1965: Beiheft: Elektronische Datenverarbeitung, S. 45

sind bestimmte Koeffizienten des Modelles nicht determiniert, sondern die Werte liegen nur in Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor. Dies entspricht zwar der betrieblichen Wirklichkeit eher, jedoch sind die rein mathematischen Probleme noch nicht soweit geklärt, daß praktische Lösungsmethoden - mit Ausnahme von Sonderfällen - zur Verfügung stehen.^{1) 2)}

cc) Ganzzahlige Optimierung³⁾

Bei manchen praktischen Problemen sind nur ganzzahlige Lösungen sinnvoll; wenn z.B. die Variablen unteilbare Einheiten sind, wie die Zahl der Arbeiter, Anzahl der Fahrten mit einem Beförderungsmittel oder die Stückzahl von Produkten. Dabei kann sich die Ganzzahligkeit auf alle Variablen beziehen ("all integer problem"⁴⁾) oder nur auf einige, während es den anderen erlaubt ist zu variieren ("mixed integer programming"⁵⁾). Die Bedeutung des "Ganzzahligen Optimierens" zeigt sich weniger bei den Beispielen mit großen absoluten Zahlen - hier er-

1) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 34

2) Theoretische Lösungen bei Joks, H.C.: a.a.O., S. 169 - 172 und Shepard, R.W.: Linear Programming mit unbestimmten Werten. In: Ablauf- und Planungsforschung 1964 (5), S. 68 - 89; ein praktisches Beispiel findet sich bei König, J.W.J.: Produktionsplanung bei unsicheren Absatzmengen. In: Erdöl und Kohle - Erdgas-Petrochemie. 1964 (17), S. 729 - 735

3) Durch zusätzliche Bedingung der Ganzzahligkeit der Variablen existieren innerhalb des Lösungsbereiches also nur endlich viele Lösungen, so daß man hier auch vom "Programmieren mit diskreten Variablen" spricht. Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 79

4) Hadley, G.: a.a.O., S. 251

5) Dinkelbach, W. - Hax, H.: Die Anwendung der gemischt ganzzahligen linearen Programmierung auf betriebswirtschaftliche Entscheidungsprobleme. In: ZfhF (NF) 1962 (14), S. 179 - 196, besonders S. 181 - 184

scheint eine Auf- bzw. Abrundung unproblematisch¹⁾ - als vielmehr bei absolut kleinen Zahlen, wie sie etwa bei Investitions- und Personalplanungsproblemen auftreten.²⁾ GOMORY³⁾ ist es gelungen, einen Lösungsalgorithmus zu entwickeln und die Endlichkeit der Lösungsschritte zu beweisen. Die praktischen Erfahrungen mit diesem Algorithmus sind jedoch ziemlich enttäuschend, da die Anzahl der Iterationen selbst bei einem kleinen Ausgangsproblem groß ist.⁴⁾

dd) Parametrische Optimierung⁵⁾

Da die Behandlung mit den neuen Verfahren - etwa der Simplexmethode - zu jedem numerisch gegebenen Problem genau die zugehörige Lösung liefert und somit die funktionale Abhängigkeit der Lösung von den Ausgangsdaten des Problems nicht mehr so deutlich zum Ausdruck kommt, wie etwa bei expliziten Formeln einfacher Probleme, hat man bald nach Möglichkeiten zur Prüfung der Empfindlich-

1) Vgl. Albach, H.: Lineare Programmierung als Hilfsmittel betrieblicher Investitionsplanung. In: ZfhF (NF) 1960 (12), S. 546 - 549, hier Fußnote S. 536: Antwort Dantzig an Albach

2) Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 76/77

3) Vgl. Hadley, G.: a.a.O., S. 272 - 276 und Joks, H.C.: a.a.O., S. 194 - 199

4) Hadley, G.: a.a.O., S. 252

5) Vgl. Joks, H.C.: a.a.O., S. 101 - 118. Anstelle der Parametrischen Optimierung spricht man auch von Sensibilitätsanalyse. - Müller-Merbach trennt allerdings zwischen Sensibilitätsanalyse und Parametrischer Optimierung. Mit der Sensibilitätsanalyse will er die Frage beantworten, für welche Datenbereiche die berechnete Lösung optimal ist, d.h. ab welcher Grenze sich das Optimum ändert. Die Parametrische Optimierung gibt Antwort darauf, wie sich die Optimallösung ändert, wenn sich die Ausgangsdaten verschieben. Vgl. Müller-Merbach, H.: Lineare Planungsrechnung. In: ADL-Nachrichten 1968, S. 162 - 170, hier S. 163. - Wir wollen unter Parametrischer Optimierung beide Gesichtspunkte zusammenfassen.

keit gefundener optimaler Lösungen gesucht.¹⁾ Die Wichtigkeit dieser Möglichkeiten für die Praxis wird unter Bezug auf die in der Wirtschaft üblichen Schwankungen von Preisen, Kosten und Qualitäten deutlich.

Folgende Fälle sind denkbar:²⁾

- (1) Eine Variation der Koeffizienten der Zielfunktion; z.B. bei Preis- oder Kostenänderungen. Dabei lassen sich
 - a) Ein - Parameter - Probleme und
 - b) n - Parameter - Probleme unterscheiden.
- (2) Eine Änderung der Koeffizienten der rechten Seite des Gleichungssystems (z.B. Kapazitätsänderungen beim Produktionsmodell).
- (3) Eine Variation der Koeffizienten innerhalb der Matrix (z.B. Änderung der technischen Koeffizienten).

Alle Änderungen lassen sich unter 2 Gesichtspunkten betrachten:³⁾

Einmal als eine Analyse, wie sich Struktur und Optimum des Modells verändern, wenn sich die Inputdaten ändern, und zum anderen, wie groß die Veränderung sein darf, damit die Struktur der Lösung nicht variiert.

Bei Rechnungen dieser Art ist die Verwendung eines Analogrechners besonders günstig, da es dort unter Umständen sogar möglich ist, Parameteränderungen während des

1) Vgl. Kern, W.: Die Empfindlichkeit linear geplanter Programme. In: Betriebsführung und Operations Research. Hrsg.: Angermann, A. Frankfurt/M. 1963, S. 49 - 79

2) Vgl. Arnoff, E.L. - Sengupta, S.S.: Mathematical Programming. In: Progress in Operations Research. Vol. I. Hrsg.: Ackoff, R.L. New York - London 1961, S. 106 - 210, hier besonders S. 175 - 180 mit der dort angegebenen Literatur

3) Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 271

Rechenvorgangs vorzunehmen. Auf einem Oszillographen lassen sich die Veränderungen der Lösung dann kontinuierlich beobachten.¹⁾

ee) Dynamische Optimierung²⁾

Bei unseren bisherigen Betrachtungen ist unser Problem - die Vorbereitung der Entscheidung - immer als einstufig betrachtet worden, d.h. die variable Zeit hat keine Rolle gespielt. Sind aber in einem Zeitraum mehrere Entscheidungen zu fällen, so spricht man von mehrstufigen Entscheidungsmodellen oder Entscheidungsprozessen.³⁾ Von der geschichtlichen Entwicklung her läßt sich unterscheiden zwischen dem sogenannten "dynamic linear-programming problem"⁴⁾, als einer Unterform des Linear Programming, mit einer Erweiterung des statischen Linear Programming-Problems auf eine Anzahl Zeitperioden und dem sogenannten "dynamic programming", das sich allgemein auf die Behandlung von mehrstufigen Prozessen⁵⁾

-
- 1) Vgl. Neumann, Th.: Der elektronische Analogrechner ..., a.a.O., S. 26 und S. 67 - 69
 - 2) Vgl. Munz, M.: Technik und Anwendungsmöglichkeiten der dynamischen Planungsrechnung. In: ZfB 1959 (29), S. 357 - 365 und Winkel, H.: Dynamische Planungsrechnung (Dynamic Programming). In: ZfB 1959 (29), S. 259 - 268
 - 3) Vgl. Schmidt, K.-U.: Beitrag zur Theorie ..., a.a.O., S. 87 - 89 mit Beispielen S. 90 - 124
 - 4) Vgl. Arnoff, E.L. - Sengupta, S.S.: a.a.O., S. 169 - 171
 - 5) Vgl. v. Falkenhausen, H.: Optimallösungen für Entscheidungsfolgen. Ermittlung durch analytische Methoden (dynamic programming) und Simulation. In: IBM - Fachbibliothek Form 78105 - 11.63. S. 3. Die Vorgänge im System bezeichnet man allgemein als Prozeß. Folgende Größen beschreiben den Ablauf dieses Prozesses:
 - Stufe (stage). Der Prozeß läuft im betrachteten Zeitraum über mehrere Stufen m;
 - Zustand (state). Bei jeder Stufe m sind i Zustände des Systems möglich;

Fortsetzung siehe Seite 47

bezieht, wobei die einzelnen Stufen nicht notwendigerweise Zeitabschnitte zu sein brauchen. Seit der gleichlautenden Veröffentlichung von BELLMAN¹⁾ herrscht letztere Auffassung unter Einschluß der unter der sogenannten dynamic linear-programming dargestellten Beispiele²⁾ vor. Die Entwicklung des allgemeinen "dynamic programming" ist dabei aufs Engste mit dem Namen des amerikanischen Mathematikers BELLMAN³⁾ verbunden, der auch das Optimierungsprinzip dieser Probleme entdeckt hat, indem er ihnen eine Funktionalgleichung - neben der Zielfunktion⁴⁾ - zuordnet und versucht, den vieldimensionalen einstufigen Entscheidungsprozeß in einen vielstufigen, möglichst eindimensionalen Prozeß zu verwandeln⁵⁾ - also

5) Fortsetzung von Seite 46:

- Entscheidungsraum (policy space). Bei jeder Stufe ist eine Entscheidung zu fällen, für die es mehrere Alternativen im Entscheidungsraum gibt;
- Zielfunktion (objective function). Die Funktion, die Ertrag oder Kosten jeder Entscheidung für jeden Zustand definiert;
- Optimalplan (optimal policy). Die Entscheidungsfolge, die bei m noch verbleibenden Stufen den Gesamt-ertrag optimiert.

- 1) Vgl. Bellman, R.: Dynamic Programming. Princeton 1957
- 2) Hierbei handelt es sich um das "Caterer Problem", das "Productions-Smoothing Problem" und das "Warehouse-Problem". Nähere Einzelheiten siehe Arnoff, E.L. - Sengupta, S.S.: a.a.O., S. 171 - 174; vgl. auch Bellman, R.: Dynamic Programming and the Smoothing Problem. In: Mgmt.Sci. 1956 (3), S. 111 - 113
- 3) Vgl. Bellman, R.: Some Applications of the Theory of Dynamic Programming - A Review. In: JORSA 1954 (2), S. 275 - 288; Bellman, R.: Dynamic ..., a.a.O.; Bellman, R. - Dreyfus, S.E.: Applied Dynamic Programming. Princeton 1962
- 4) Vgl. Fletcher, A. - Clarke, G.: Mathematische Hilfsmittel der Unternehmensführung. Dt.: L. Pack, Engl.: Management and Mathematics - The Practical Techniques Available (1964). München 1966, S. 201
- 5) Vgl. Zimmermann, H.J.: a.a.O., S. 35 - 37; besonders Bellman, R.: Some Applications ..., a.a.O., S. 277: "Its importance lies in the fact that it translates a problem in policy sequences into one involving perhaps more amenable functions."

etappenweise zu entscheiden.¹⁾ Dabei soll immer das sogenannte Optimalitätsprinzip gelten, das besagt, daß - wie immer der ursprüngliche Zustand und die ursprüngliche Entscheidung auch aussehen - die restlichen Entscheidungen ein optimales Vorgehen im Hinblick auf den Zustand, der sich aus der ersten Entscheidung ergibt, darstellen sollen.²⁾ Die Methode, die dabei angewandt wird, basiert auf der mathematischen Idee der Rekursion.³⁾ Die allgemeinen Merkmale der dynamischen Optimierung lassen sich folgendermaßen darstellen:

- a) Es treten mehrstufige Prozesse auf;
- b) jede Stufe des Problems kann durch eine kleine Anzahl von Parametern beschrieben werden (Zustandsvariable);
- c) auf jeder Stufe gibt es verschiedene Alternativen für die Parameter;
- d) das Ergebnis einer Entscheidung ist eine Transformation der Zustandsvariablen;
- e) Ziel des Prozesses ist die Optimierung irgendeiner Funktion der Zustandsvariablen.⁴⁾

Es werden dabei nicht nur deterministische Modelle verwendet, sondern die Überlegungen erstrecken sich auch auf stochastische Probleme. Allerdings ergeben sich im

1) Vgl. Faure, R. - Boss, J.-P. - Le Garff, A.: a.a.O., S. 43

2) Vgl. Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 233. Die offizielle Definition lautet: Bellman, R.: Some Applications ..., a.a.O., S. 285 --- "Principle of Optimality: An optimal policy has the property that whatever the initial state and initial decision are, the remaining decisions must constitute an optimal policy with regard to the state resulting from the first decision, and we have basic ingredients of the theory of dynamic programming."

3) Vgl. Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 277 mit Beispiel S. 278 und v. Falkenhausen, H.: Optimallösungen ..., a.a.O., S. 3 - 5

4) Vgl. Arnoff, E.L. - Sengupta, S.S.: a.a.O., S. 285 ergänzt mit Stahlknecht, P.: Operations Research - Leitfaden ..., a.a.O., S. 50/51

allgemeinen bei der Lösung mathematische Schwierigkeiten, die eine praktische Lösung noch fraglich erscheinen lassen.^{1) 2)}

Ein großer Vorteil der "Dynamischen Optimierung" besteht darin, daß die Variablen und Funktionen nicht stetig oder differenzierbar zu sein brauchen. Es genügt, wenn die zu optimierende Funktion nur tabellarisch gegeben ist. Ein Nachteil liegt darin, daß die Anzahl der Zustandsvariablen nur klein sein darf, da sich sonst rechentechnische Schwierigkeiten ergeben.

Zum Abschluß wollen wir noch in einem Schema die Kriterien des "Mathematical Programming" und ihr Vorhandensein bei den einzelnen Sonderfällen zusammenfassend darstellen. (Schema siehe Seite 50)

3. Die Spieltheorie³⁾

Während man bei den bisherigen Problemen des "Mathematical Programming" von gegebenen Voraussetzungen in Form von

- (a) zu leistender größtmöglicher Arbeit bei bestimmten vorhandenen Mitteln und

1) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 37

2) Diese allgemeinen Ausführungen werden für jemanden, der noch keine größeren Kenntnisse von Dynamic Programming besitzt, unanschaulich und vage bleiben. Deshalb möchten wir zur besseren Information auf die Beispiele bei Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung ..., a.a.O., S. 204 - 233 verweisen.

3) Darstellungen über die Spieltheorie finden sich in allen bekannten Lehrbüchern über Operations Research: z.B. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 471 - 523;
Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 234 - 259;
Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 164 - 192;
Kromphardt, W. - Henn, R. - Förstner, K.: a.a.O., S. 227 - 248

GRUNDFORMEN DES "MATHEMATICAL PROGRAMMING"

KRITERIEN / FORMEN	LINEAR PROGRAMMING	NON - LINEAR PROGRAMMING	STOCHASTISCHE OPTIM.	PARAMETRISCHE OPTIMIERUNG	DYNAMISCHE OPTIMIERUNG	GANZZAHLIGE OPTIMIERUNG
Lineare Funktionen	•	Funktionen 2.- und 3. Grades, logarithmische Funktionen	•	•	•	•
deterministische Koeffizienten	•	•	Koeffizienten der Gleichungen entstehen statistischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen	•	•	•
Konstante Inputdaten	•	•	•	Inputdaten ändern sich	•	•
Statische Betrachtung	•	•	•	•	Zeitfunktion	•
Einstufige Entscheidung	•	•	•	•	Entscheidungsprozesse	•
Ganzzahligkeit der Ergebnisse	e/n	e/n	e/n	e/n	e/n	Ganzzahligkeit der Ergebnisse

• • bei der einzelnen Form ist das Kriterium erfüllt.

e/n = neben dem Fall, daß das Kriterium erfüllt ist, ist es auch möglich, daß es nicht erfüllt ist.

In einzelnen brauchen bei den einzelnen Unterformen das "MATHEMATICAL PROGRAMMING" die Kriterien nicht immer erfüllt sein. So ist es z.B. bei der "Parametrischen" Optimierung möglich, daß auch stochastische Koeffizienten bestehen oder bei der "Ganzzahligen" Optimierung nichtlineare Funktionen.

(b) zur Verfügung stehenden Mitteln zur größtmöglichen Ausnutzung ausgeht

und die Bedingungen zur Erreichung eines Optimums festzustellen sucht, nimmt die Spieltheorie die Erreichung eines bestimmten Zieles (Ertrags) als gegeben an und untersucht nur die variablen Voraussetzungen zur Erreichung des Zieles auf ihre optimale Kombination.¹⁾ Dabei handelt es sich nicht mehr um einen Interessenkonflikt innerhalb einer Organisation, d.h. die Maßnahmen der Unternehmensleitungen sind nicht als autonom zu betrachten,²⁾ sondern um einen auch von äußeren Beeinflussungen (Organisationen) abhängigen Konflikt.³⁾ Auf diese betriebliche "Spiel"-situation ist in dem 1943 erschienenen Buch "Theory of Games and Economic Behavior"⁴⁾ von MORGENSTERN und von v.NEUMANN Bezug genommen worden, in dem sie versucht haben, diese mit der, seit 1928 von letzterem entwickelten, Spieltheorie zu lösen. Nach der Art der Spiele lassen sich sogenannte strategische Spiele, deren Ergebnis eindeutig vom Verhalten der Spieler abhängt und vom Zufall abhängige Glücksspiele (z.B. Roulette) unterscheiden. Letztere sollen hier außer Betracht bleiben. Dabei ist ein "Spiel" dadurch gekennzeichnet, daß man Regeln - durch Übereinkunft gegeben, technologisch bedingt oder naturgegeben - annimmt, die für die Spieler verbindlich sind. Unter der Fülle der möglichen Verhaltensweisen der verschiedenen Spieler wollen wir nur das rationale Vorgehen - Strategie genannt - betrachten. Dabei verstehen wir unter Strategie

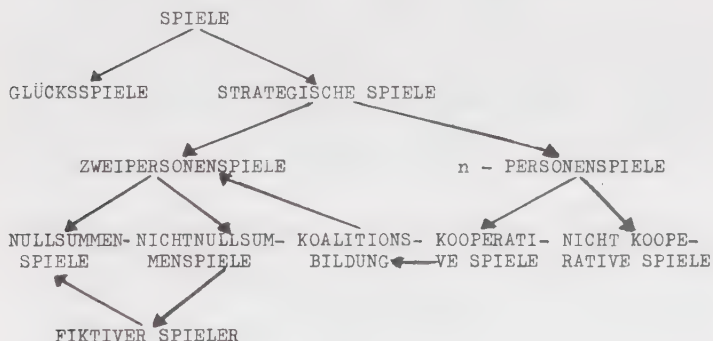
-
- 1) Vgl. Operations Research - Unternehmensforschung. Die Spieltheorie. In: Betriebswirtschaftliches Repetitorium, Beilage zu ZfB 1959 (29), S. 49 - 50, hier S. 49
 - 2) Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 73
 - 3) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 471
 - 4) Vgl. v. Neumann, J. - Morgenstern, O.: Spieltheorie und wirtschaftliches Verhalten. Dt.: (3. Aufl. 1953) Leppig, M. Würzburg 1961

des Spielers "einen vollständigen Plan, der dem Spieler angibt, welche Entscheidung er während der einzelnen Züge jeweils unter den ihm zur Verfügung stehenden Informationen zu machen hat."¹⁾ Es wird also durch die Festlegung der Strategie für jeden Zug, jeder möglichen Information über den bisherigen Verlauf der Partie eine in diesem Zug mögliche Alternative zugerechnet. Innerhalb der Strategie unterscheiden wir zwischen einer "reinen" Strategie, die vor allen Spielzügen gefällt wird und eine spezielle Verhaltensweise erwählt, und einer "gemischten" Strategie, die darin besteht, eine Verhaltensweise für jeden Zug, gemäß einer speziellen Wahrscheinlichkeitsverteilung, festzulegen.²⁾ Die Ergebnisse aller möglichen Strategien werden gewöhnlich in einer sogenannten Auszahlungs- oder "pay-off"-Matrix zusammengestellt. Gibt es in dieser Matrix einen für alle Spieler optimalen Wert, so hat man einen "Sattelpunkt".³⁾ Die strategischen Spiele teilen sich nach der Anzahl der beteiligten Personen in Zweipersonen- und n-Personenspiele auf. Letztere können bis heute nur unter bestimmten Annahmen gelöst werden (z.B. Koalitionsbildung) und lassen

-
- 1) Henn, R.: Strategische Spiele und unternehmerische Entscheidungen. In: ZfB 1958 (28), S. 277 - 286, hier S. 279
 - 2) Vgl. Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 165
 - 3) Zur Veranschaulichung vergleiche die Beispiele bei Vajda, S.: Theorie der Spiele und Linearprogrammierung. Dt.: Kesting, H. - Rittel, H. Engl.: The Theory of Games and Linear Programming. Berlin 1962, S. 13 - 15. Bei Vorhandensein eines Sattelpunktes ergibt dieser eindeutig die zu wählende Strategie. "There exists a number v , a pure strategy (a maximin strategy) for player 1 which guarantees him at least v , and a pure strategy (a minimax strategy) for player 2 which guarantees that player 1 gets at most v . These pure strategies are in equilibrium, and any pair of pure strategies which are in equilibrium yield a maximin and minimax strategy for 1 and 2 respectively. Luce, D.R. - Raiffa, H.: Games and Decisions - Introduction and Critical Survey. New York 1957, S. 71

sich ihrerseits in kooperative und nicht-kooperative Spiele unterscheiden.¹⁾ Gewinnt die eine Seite, was die andere verliert - Gewinne und Verluste sämtlicher Parteien heben sich auf - so spricht man von Nullsummenspielen; gewinnt eine Partei mehr als die andere verliert, von Nichtnullsummenspielen. Nichtnullsummenspiele lassen sich durch Einführung eines fiktiven Spielers (z.B. Staat als Steuereinnahmer) auf Nullsummenspiele zurückführen.²⁾

Zur abschließenden Übersicht sei noch eine schematische Darstellung angeführt.



Die Vielzahl von Veröffentlichungen mit Beispielen³⁾ kann keineswegs darüber hinwegtäuschen, daß die praktische Anwendung im wirtschaftlichen Bereich doch relativ gering ist. Es läßt sich allerdings nicht leugnen, daß

1) Vgl. Vajda, S.: a.a.O., S. 12

2) Vgl. Boulding, K.E. - Spivey, A.W.: Linear Programming and the Theory of the Firm. 2^d Printing, New York 1960, S. 74

3) Vgl. Herrmann, E.: Spieltheorie und lineares Programmieren. Köln 1964, S. 47 - 119 mit seinen vielfältigen Beispielen für den Schulunterricht.

die Spieltheorie bei sehr komplexen Problemen als allgemeine Orientierung eine wesentliche Hilfe bilden kann und hierin ihr größter gegenwärtiger und vielleicht auch zukünftiger Beitrag liegt.¹⁾

Für die praktische Anwendung in der Glasfertigung können wir uns keine realistischen Beispiele vorstellen; die Spieltheorie ist hier nur der Vollständigkeit halber angeführt worden und wird im folgenden keine Beachtung mehr finden.

4. Die Netzplantechnik

In den letzten Jahren ist zu den schon sowieso recht heterogenen Planungsverfahren des Operations Research ein weiteres Verfahren hinzugekommen, das wegen seiner Praktikabilität rasch Verbreitung gefunden hat. Es handelt sich um die sogenannte Netzplantechnik,²⁾ auch Netzwerk-

-
- 1) Williams führt dazu aus: "..., despite the limitations of the theory, perhaps its greatest contribution so far has been an intangible one: the general orientation given to people who are faced with overcomplex problems. Even though these problems are not strictly solvable - certainly at the moment and probably for the indefinite future - it helps to have a frame work in which to work on them. The concept of a strategy, the distinctions among players, the role of change events, the notion of matrix representations of the pay-offs, the concept of pure and mixed strategies, and so on give valuable orientation to persons who must think about complicated conflict situations." Williams, J.D.: The Compleat Strategyst. 6th Printing. 1st Edition 1954, New York 1954, S. 247
- 2) Folgende Autoren verwenden diesen Begriff:
Breu, M.: Netzplantechnik im Terminwesen. In: Industrielle Organisation 1962 (31), S. 297 - 306;
Budil, W.: Die Praxis der Netzplantechnik. In: Industrielle Organisation 1964 (33), S. 303 - 316;
v. Falkenhausen, H.: Prinzipien und Rechenverfahren der Netzplantechnik. In: ADL-Nachrichten 1964 (9), S. 19 - 30, 268 - 279, 340 - 354;
Thumb, H.: Netzplantechnik, die neue Methode der Terminplanung und Terminüberwachung. In: Zwf 1964 (59), S. 291 - 298

analyse¹⁾ oder Netzwerktechnik²⁾ genannt. Die drei bekanntesten Methoden der Netzplantechnik sind CPM (Critical Path Method) PERT (Program Evaluation and Review Technique) MPM (Metra-Potential-Methode)

Diese Methoden sind völlig unabhängig voneinander etwa zur gleichen Zeit entwickelt worden.³⁾ Sie benutzen alle ein graphisches Modell zur Darstellung des zeitlichen Ablaufs eines Projektes⁴⁾ - den Netzplan. Dabei unterscheiden sich die einzelnen Methoden in der Aufstellung des Netzplanes, der Verwendung der Daten sowie der Berechnung derselben und den Informationen, die man daraus

-
- 1) Vgl. Ferbig, G. - Joseph, S.: Zur Bedeutung der Netzwerkanalyse für die Planung und Abwicklung von Investitionsvorhaben. In: Statistische Praxis 1964 (19), S. 151 - 156;
Holzer, H.-P. - Karling, F.: Netzwerkanalysen (PERT und CPM) als Mittel der Planung. In: Die Wirtschaftsprüfung 1963 (17), S. 145 - 149
 - 2) Vgl. Mertens, Peter: Netzwerktechnik als Instrument der Planung. In: ZfB 1964 (34), S. 382 - 407
 - 3) CPM ist in den Jahren 1956/57 von E.J. du Pont de Nemour & Company in Zusammenarbeit mit Remington Rand Univac entwickelt worden. Anfang 1958 ist PERT von der Special Project Office der Marine unter Assistenz von Lockheed System Division und der Beratungsfirma Booz, Allen & Hamilton erarbeitet worden.
MPM ist von der Beratungsfirma SEMA (Société d'Economie et de Mathématique Appliquées) in Frankreich entwickelt worden. Vgl. Algan, M.: Reihenfolgeprobleme und Graphentheorie. In: Ufo 1964 (8), S. 53 - 64
 - 4) Der Begriff des Projektes gibt in etwa schon das Anwendungsgebiet der Netzplantechnik wieder. Es handelt sich bei den Grundformen (CPM, PERT, MPM) im wesentlichen um Anwendungen bei Einzelfertigung und um sogenannte Organisationsumstellungen (z.B. in der Glasfabrik Wannenreparatur). Mit der Einbeziehung von Kosten-, Kapazitäts- und Personalüberlegungen kommen allerdings weitere Anwendungsgebiete hinzu. Vgl. die Beispiele bei Wille, H. - Gewalt, K. - Weber, H.D.: Netzplantechnik - Methoden zur Planung und Überwachung von Projekten. Bd. I Zeitplanung. München - Wien 1966, S. 16 - 19

entnehmen kann.¹⁾ Alle drei Methoden sind in ihren ersten Ausarbeitungen reine Terminplanungsmethoden zur Planung und Überwachung einzelner Projekte gewesen. Ihr Vorteil gegenüber den herkömmlichen Planungsmethoden besteht in einer strikten Trennung von Struktur- und Zeitanalyse.²⁾ Die Strukturanalyse ergibt sich aus der Aufstellung eines Netzplanes (Netz, Netzwerk, net-work, noyau, graphe).³⁾ Als Netzplan bezeichnet man eine graphische Darstellung, wie sie folgendes Bild wiedergibt.

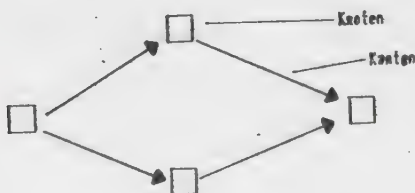


Abb. 1

Mathematisch gesehen ist der Netzplan ein gerichteter Graph. Die Elemente des Netzplanes, Kreise (nach der Terminologie der Graphentheorie Knoten genannt) und Pfeile (Kanten) unterscheiden sich bei den einzelnen Methoden in Benennung und Bedeutung. Zur Darstellung des Netzplanes bedarf es einer Auflösung des Projektes in einzelne Teilarbeiten (Tätigkeiten). Der Begriff der Tätigkeit (Vorgang, Aufgabe, Aktivität) ist dabei weit zu

-
- 1) Vgl. Wille, H. - Gewald, K. - Weber, H.D.: a.a.O., S. 29
 - 2) Vgl. Kattwinkel, W.: Über 2 Anwendungsmöglichkeiten von Netzwerken mit gerichteten Teilstrecken (directed graphs) IBM Form 78101, S. 3
 - 3) Zusammenhänge zwischen zwei Knoten, die nicht direkt durch eine Tätigkeit verbunden sind, aber trotzdem in der Arbeitsfolge voneinander abhängen, werden durch eine sogenannte Scheintätigkeit (gestrichelte Linie) verbunden.

fassen und umfaßt alle Vorgänge, die Zeit beanspruchen (manuelle und maschinelle Arbeiten, Fertigungsverfahren, Lieferzeiten, ...). Neben der Erfassung der Tätigkeiten muß man auch noch die Bedingungen, d.h. die Anordnungsbeziehungen der Tätigkeiten bestimmen. Im Netzplan kommt dies durch die Verknüpfung von Knoten und Kanten zum Ausdruck.¹⁾ Wenn wir dabei auch Zeitwerte mit aufnehmen, erhalten wir einen zeitlichen Netzplan. Die Zeitschätzwerte²⁾ können sich je nach Methode auf die Dauer einer Tätigkeit oder auf den minimalen zeitlichen Abstand des Beginns zweier Tätigkeiten beziehen. Allen Methoden gemeinsam ist jedoch, daß die Zeitschätzwerte Zeitspannen darstellen und keine Termine bzw. Zeitpunkte. Diese Zeitschätzwerte dienen zur Berechnung eines Terminplanes. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten um vom Netzplan zum Terminplan zu kommen; die graphische Konstruktion und die rechnerische Ermittlung, wobei letztere manuell oder mit Hilfe einer elektronischen Rechanlage durchgeführt werden kann. Bei größeren Objekten empfiehlt sich natürlich immer die rechnerische Ermittlung unter Einsatz eines Computers.³⁾ Für eine einfache und anschauliche Problemdarstellung ziehen wir hier aber die graphische Darstellung vor. Wir verwenden einen CPM-Netzplan, bei dem die Kanten die Tätigkeiten und die Knoten die zeitlichen Anfangs- bzw. Endpunkte der Tätig-

-
- 1) Zusammenhänge zwischen zwei Knoten, die nicht direkt durch eine Tätigkeit verbunden sind, aber trotzdem in der Arbeitsfolge voneinander abhängen, werden durch eine sogenannte Scheintätigkeit (gestrichelte Linie) verbunden.
 - 2) Nähere Einzelheiten über die Zeitschätzung finden sich bei Archibald, R.D. - Willoria, R.L.: Network - Based Management Systems (PERT/CPM) New York - London - Sydney 1967, S. 76 - 90
 - 3) Für die Verwendung im Computer bedürfen die Knoten einer Kennzeichnung durch Nummern. Man unterscheidet eine willkürliche (wahllose) Numerierung und eine systematische Numerierung - der Knoten am Ende der Kante trägt stets eine höhere Nummer als der Knoten am Anfang.

keiten darstellen. Die Knoten werden dabei als Ereignisse bezeichnet.¹⁾ Die graphische Konstruktion²⁾ besteht einfach darin, daß man den zeitlichen Netzplan in einen zeitproportionalen Netzplan überführt, indem man die Projektion der geometrischen Länge jeder Kante auf einen Zeitmaßstab so wählt, daß sie ihrer jeweiligen Zeitdauer proportional ist. Legt man folgenden Zeitplan zugrunde,

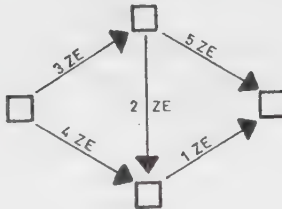


Abb. 2

- 1) PERT benutzt die gleichen Bezeichnungen für Kante (Tätigkeit) und Knoten (Ereignisse). Allerdings liegt beim PERT das Schwergewicht auf den Ereignissen. Man beschreibt bei PERT die Ereignisse und nicht die Tätigkeiten. In der Ermittlung der Zeitschätzwerte zeigen sich wesentliche Unterschiede. Während CPM die wahrscheinliche Zeit verwendet, verlangt die PERT-Methode eine mittlere Zeit, die aus dem

optimistischen Wert = kürzeste Zeit bei idealem Arbeitsablauf
 wahrscheinlichsten Wert = Schätzwert, der am häufigsten (wahrscheinlichsten) auftreten wird
 pessimistischen Wert = unwahrscheinlichster Wert
 nach der Formel

$$\text{mittlere Zeit} = \frac{\text{optimistische Zeit} + 4 \times \text{wahrscheinliche Zeit} + \text{pessimistische Zeit}}{6}$$

ermittelt wird. Vgl. PERT - Program Evaluation and Review Technique. Eine Methode zur Planung und Überwachung von Projekten. Hrsg.: Federal Electric Corporation. München 1965, S. 70.

Die statistisch-theoretische Herleitung der Formel findet sich bei Kattwinkel, W.: a.a.O., S. 7/8

- 2) Vgl. im folgenden Wille, H. - Gewalt, K. - Weber, H.D.: a.a.O., S. 26 - 29

so ergeben sich daraus folgende zwei zeitproportionale Zeiträume, je nachdem, wo man mit dem Zeichnen beginnt.¹⁾

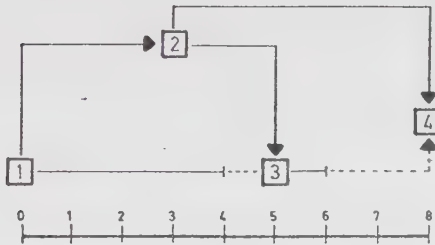


Abb. 3

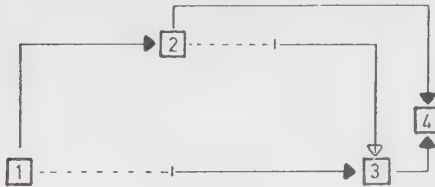


Abb. 4

Abb. 3 und Abb. 4 machen folgendes klar: Durch die Einordnung der Kanten und Knoten in ein Zeitraster gelangt man von Zeitspannen zu Zeitpunkten. Aus den Zeitwerten von Abb. 2 werden Termine gewonnen, wenn man obigen O-Punkt auf irgendein Kalenderdatum bezieht. Wir sehen weiter, daß wir nicht nur einen Terminplan erhalten, sondern zwei extreme Pläne. In Abb. 3 sind alle Knoten und Kanten soweit wie möglich nach rechts verschoben, d.h. natürlich nur soweit, daß die minimale Dauer des Projekts eingehalten wird. Im ersten Fall beginnen und enden alle Tätigkeiten der Projekte so früh als möglich bzw. die Ereignisse (Universalmindestlösung) treten ein.

1) Wir haben im folgenden sogar eine lückenlose Numerierung, die bei manchen Rechenproblemen Bedingung ist.

Im zweiten Fall enden alle Tätigkeiten spätestens zulässig bzw. treten alle Ereignisse spätestens zulässig ein (Universalthöchstlösung). In Wirklichkeit existieren natürlich wegen der Knoten und Kanten, die verschoben werden können, ohne daß sich dabei die Gesamtdauer ändert, unendlich viele Lösungen. Man sagt, die Kanten und Knoten, die verschoben werden können, haben Spielraum oder Schlupf. Je nach der angewandten Methode der Netzplantechnik ergibt sich ex definitione für bestimmte Tätigkeiten und Ereignisse ein unterschiedlich großer Schlupf. Knoten und Kanten, die keinen Spielraum besitzen, werden als kritisch bezeichnet. Die Folgen aller Knoten und Kanten, die keinen Spielraum besitzen, bezeichnet man als kritischen Weg, da jede Verzögerung auf diesem Weg die Gesamtdauer des Projekts erhöht. Der kritische Weg ist der "zeitlich längste" Weg im Netzplan und bestimmt somit den Endtermin des Projekts.¹⁾ Jede Tätigkeit auf dem kritischen Weg, die sich zeitlich verzögert, bewirkt eine Verschiebung des Endtermins. Für unser kleines Beispiel ist ohne weiteres ersichtlich, daß Knoten 1, 2 und 4 und die Kanten 1 - 2 und 2 - 4 kritisch sind. Frühest mögliche und spätestens zulässige Termine, Spielraum, kritische Tätigkeiten bzw. Ereignisse und kritischer Weg sind die Ergebnisse, die sich aufgrund der im Netzplan enthaltenen Daten berechnen lassen. Dies gilt für alle drei Methoden CPM, PERT und MPM, wobei sich bestimmte arbeitstechnische Unterschiede ergeben, auf die aber im einzelnen nicht näher eingegangen werden soll.^{2) 3)}

1) Vgl. die entsprechenden Überlegungen für PERT: PERT - Program Evaluation ..., a.a.O., S. 99

2) Vgl. dazu besonders Wille, H. - Gewalt, K. - Weber, H.D.: a.a.O., S. 34 - 74 und die Spezialliteratur für die einzelnen Methoden

3) Eine zusammenfassende Bewertung findet sich bei Wille, H. - Gewalt, K. - Weber, H.D.: a.a.O., S. 71 - 74

Das Auftreten von Spielräumen erlaubt es nicht nur, Tätigkeiten im Rahmen des zulässigen zu verschieben, sondern auch Kapazitätsgegebenheiten zu berücksichtigen sowie gegebenenfalls mehrere Projekte zu einem Multiprojekt zu koppeln. Dabei werden die Netzpläne der Einzelobjekte so miteinander verflochten, daß keine Kapazitätsbeschränkungen verletzt werden.¹⁾ Die Kapazitätsbeschränkungen können sich dabei sowohl auf eine Einhaltung der Kapazitätsbedingungen schlechthin, als auch auf einen Ausgleich unterschiedlicher Kapazitätsauslastungen der Arbeitsplätze im Zeitablauf erstrecken. Im ersten Fall, den sogenannten Manpower-Scheduling-Programs und den Resource-Allocations-Problems, erfolgen aufgrund der Netzpläne zunächst Zuteilungen von Tätigkeiten auf Arbeitsplätze und dann Verschiebungen, wenn die Einhaltung vorgegebener Termine durch die Zuteilung in Frage gestellt ist. Im zweiten Fall strebt man eine Glättung der zeitlichen Ausnutzungsgrade für sämtliche oder nur gewisse Arbeitsplätze an (Manpower-Leveling-Programs).²⁾

Beim System PERT/COST^{3) 4)} werden die zu Beginn des Projektes geplanten Zeit-Kosten-Relationen laufend überwacht.⁵⁾

1) Praktische Bedeutung hat hier vor allem RAMPS (Resource Allocation and Multi-Project-Scheduling) erlangt.

2) Vgl. Levy, F.K. - Thompson, G.L. - Wiest, J.D.: Multiship, Multishop, Workload-Smoothing Program. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1962 (9), S. 37 - 44

3) Natürlich bezieht sich das auch auf mit CPM geplante Projekte. Vgl. Kelley, E.J. jr.: Critical Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis. In: JORSA 1961 (9), S. 296 - 320

4) Über Geschichte (S. 97) und Anwendung (S. 99 - 122) vgl. im einzelnen Miller, R.W.: Zeit-Planung und Kosten-Kontrolle durch PERT. Ein Leitfaden für die Anwendung in Entwicklung und Fertigung. Berlin 1965. Dt.: Häger, W. - Klante, H. - Topel, H. sowie Mertens, P.: Netzplantechnik als Instrument der Planung. In: ZfB 1964 (34), S. 382 - 407, hier S. 391 - 395

5) Ein weiteres Verfahren existiert unter dem Namen LESS (Least Cost Estimating and Scheduling)

Für die Bearbeitung eines praktischen Beispiels unterscheiden wir zwei Anwendungsphasen: die Planungsphase und die Überwachungsphase.¹⁾ Die Planungsphase liegt vor Beginn des Projektes und versucht einen möglichst guten Terminplan zu konstruieren. In der Überwachungsphase bei der Abwicklung des Projektes erfaßt man die Abweichungen der in der Planungsphase vorgegebenen Termine und baut auf deren Grundlage einen neuen Terminplan auf mit unter Umständen neuen kritischen Pfaden und neuen Endterminen. Wir wollen uns mit diesen allgemeinen Ausführungen über die Netzplantechnik begnügen und für Einzelheiten auf die Spezialliteratur verweisen.²⁾ Über eine grundsätzliche Anwendbarkeit im Bereich der Glasfertigung besteht kein Zweifel, z.B. bei der Planung und Durchführung der in größeren Zeiträumen immer wieder anfallenden Wannenreparatur. Da diese Probleme mehr den Ingenieurwissenschaften zuzuschreiben sind, werden wir auch im praktischen Teil dieser Arbeit nicht mehr darauf eingehen und uns mit dem allgemeinen Hinweis einer bestehenden Anwendbarkeit begnügen.

5. Die Lagerhaltungstheorie

Ein Gebiet, auf dem Operations Research in der Zukunft für die Lehre und vor allem für die Praxis bedeutende Erkenntnisse vermitteln kann, ist die sogenannte Lager-

1) Vgl. Wille, H. - Gewalt, K. - Weber, H.D.: a.a.O., S. 29

2) Vgl. etwa die Hinweise bei Mertens, P.: a.a.O., S. 394 - 398 und IBM-Form 71338: Einführungsschrift - PERT ... eine dynamische Methode zur Projektplanung und -überwachung. - Vgl. auch die Anwendungsmöglichkeiten von Computern bei Kattwinkel, W. - Wild, H.J.: IBM-Programme für Projektplanung und -überwachung mit Hilfe der Netzwerktechnik. (Verfahren des kritischen Weges), IBM-Form 78095

haltungstheorie. Die Vorläufer¹⁾ hierzu reichen allerdings schon relativ weit zurück, was hinsichtlich des behandelten Problemkomplexes nicht verwunderlich ist. Es gibt kaum Industrieunternehmen, bei denen eine totale Synchronisation von Anlieferung (Beschaffung) und Verarbeitung (Produktion) möglich ist. Ähnliche Überlegungen gelten für den Ablauf²⁾ im Produktionsbereich³⁾ und für den Bereich Produktion und Absatz.

So verfügt fast jede Unternehmung über Lager, die sich als Rohmaterial- (Rohstoff-, Hilfsstoff- und Betriebsstofflager), Zwischen- und Fertigerzeugnislager darstellen. Jede Lagerhaltung bedingt nun einen Einsatz von Kapital und bringt Lagerhaltungskosten mit sich; beide Aspekte können gesamtwirtschaftlich⁴⁾ und einzelwirt-

- 1) Nach Churchman, Ackoff, Arnoff ist von Harris, W.F. schon 1915 eine der heutigen Losgrößenformel ähnliche Beziehung verwendet worden. Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 185. Ebenso Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 76. Nach Orth, L.: Die Eignung der Losgrößenformel als Instrument der Produktionsplanung. In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 738 - 749, besonders S. 739, hat der Amerikaner Camp 1922 die Losgrößenformel abgeleitet. In Deutschland ist nach Kosiol die der optimalen Losgrößenformel verwandte - nur andere Symbole verwendende - optimale Bestellmengenformel 1927 von Stefanic - Allmayer veröffentlicht worden. Vgl. Kosiol, E.: Die Ermittlung der optimalen Bestellmenge. In: ZfB 1958 (28), S. 287 - 299, hier besonders S. 287
- 2) In der Fließfertigung entfallen die Zwischenlager; ihre Zielsetzung besteht ja darin, einen möglichst reibungslosen Durchfluß zu gewährleisten.
- 3) Vgl. Lanzanauer, v.Chr., Haehling: Optimale Lagerhaltung im Produktionsprozeß. Diss. Bonn 1966, S. 35 - 130
- 4) Man beachte hierzu nur die Auswirkungen einer geänderten Lagerhaltungspolitik während der Rezession 1966/67 sowie M. Abramovitz, der festgestellt hat, "that during the five business cycles between the two world wars, the average changes in inventory investment were 32,4 % as large as the changes in gross National Product." Whitin, T.M.: Inventory Control Research: A Survey. In: Mgmt.Sci. 1954 (1), S. 32 - 40, hier S. 37

schaftlich¹⁾ von Bedeutung sein. Als dritte Komponente kommt noch die Liefer- bzw. Produktionsbereitschaft hinzu. Alle drei Größen stehen in einem funktionalen Zusammenhang.

Lagerhaltungsprobleme sind operationsanalytisch unter zwei Fragestellungen behandelt worden:

- (1) Die Vertriebsanforderungen in einer bestimmten Zeitperiode, das Fertigwarenlager und die verfügbare Kapazität sind in einen grundlegenden Zusammenhang zu bringen.²⁾ Hierbei handelt es sich in erster Linie

1) Am deutlichsten treten diese Zusammenhänge in Saisonbetrieben auf: (modisch orientierte Textilindustrie, Spielwaren-, Zuckerindustrie (Rübenzucker), etc. ...)

2) Dieses Problem ist besonders in der amerikanischen Literatur unter dem Begriff "production smoothing" behandelt worden. Hanssmann beschreibt es folgendermaßen: "This problem is concerned with the conflict between the cost of imperfect synchronization of production and demand on one hand (i.e. cost of inventories and shortages), and the cost of changing the production rate and the effect of nonconstant marginal production costs on the other hand." Hanssmann, F.: Operations Research in Production and Inventory Control. New York - London 1962, S. 113, vgl. dazu auch S. 113 - 127

Weitere Autoren: Magee, J.F.: Production Planning and Inventory Control. New York - Toronto - London 1958, S. 133 - 161; Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 275 - 284; Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung ... a.a.O., S. 86 - 92, S. 199 - 203, S. 220 - 225, S. 225 - 230; Fonzi, F.: Beitrag zur Anwendung mathematischer Methoden für eine wirtschaftlichere Gestaltung der Fertigung. Diss. Aachen 1959, S. 17 ff.; Egert, Ph.: Probleme des Produktionsausgleichs. In: Ufo 1961 (5), S. 216 - 226

Unter Einbeziehung personeller Überlegungen (Ein- und Ausstellungen) behandeln das Problem: Holz, C.C. - Modigliani, F. - Simon, H.A.: A Linear Decision Rule for Production and Employment Scheduling. In:

Mgmt.Sci. 1955 (2), S. 1 - 30 und

Holt, C.C. - Modigliani, F. - Muth, J.F.: Derivation

um ein Problem der Fertigungsplanung, wobei das Lagerhaltungsproblem nur sekundär auftritt.

- (2) Viel bedeutender ist die andere Fragestellung, die das Lagerhaltungsproblem direkt betrifft, indem sie
- das "wieviel" in Auftrag zu geben ist und
 - das "wann" der Auftragserteilung
- untersucht. Die Gesamtkosten, bestehend aus mengenvariablen Lagerhaltungskosten, aus auflagenfixen Bestellkosten und den Fehlmengenkosten (opportunity costs) sollen dabei ein Minimum ergeben.¹⁾

Ausgehend von der Grundformel für die optimale Auftragsgröße²⁾ versucht die operationsanalytische Lagerhal-

2) Fortsetzung von Seite 64:

of a Linear Decision Rule for Production and Employment. In: Mgmt. Sci. 1956 (2), S. 159 - 177
Bellman, R.: Dynamic Programming and the Smoothing Problem. In: Mgmt. Sci. 1956 (3), S. 111 - 113
Als Lösungsmethode wird auch bei anderen Autoren vielfach das "Dynamic Programming" angewandt.

- 1) Hanssmann, F.: A Survey of Inventory Theory from the Operations Research Viewpoint. In: Progress in Operations Research. Ed.: Ackoff, R.L., New York - London 1961, S. 65 - 104, hier S. 68 schreibt über das Lagerhaltungsproblem: "The inventory problem to which inventory theory has addressed itself is equivalent to finding input and output functions which maximize (or minimize) a given measure of effectiveness (or uneffectiveness) subject to certain restrictions." Zur Klassifizierung dient auch die Unterscheidung in deterministische - stochastische und statische - dynamische Modelle sowie die Kombination derselben. Vgl. Hanssmann, F.: A Survey ..., a.a.O., S. 69
- 2) Die Literatur hierüber ist außerordentlich vielfältig. Wir wollen hierbei nur auf die Dissertation von Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung zwischen Produktion und Lagerung unter besonderer Berücksichtigung des Lagerbereichs - Probleme und Lösungsverfahren. Diss. Saarbrücken 1964, hinweisen, wo alle bekannten Ansätze explizit behandelt worden sind. (S. 26 - 66). Für den Einkaufsbereich können wir im einzelnen auf die zusammenfassende übersichtliche Darstellung von Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen in der Einkaufs- und Fertigungsdisposition. In: ADL-Nachrichten 1965 (10), S. 626 - 653 Teil I, verweisen. Zur Kritik vgl. Schäfer, E.: Losgröße und Kostengestaltung. In: ZfB 1931 (8), S. 823 - 832, hier S. 830 und Winkler, D.: a.a.O., S. 60/61

tungstheorie, die Mängel dieser Grundformel durch die Berücksichtigung bisher nicht erfaßter Einflußgrößen, der komplexen Wirklichkeit anzupassen. Dazu ist in der Vergangenheit eine Vielzahl von Lagerhaltungsmodellen entworfen worden. Die Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten gibt folgende von KERN¹⁾ übernommene Übersicht wieder:

- | | | | |
|---|--|---|--|
| 1) Einkaufspreis oder Herstellkosten pro Mengeneinheit | | | |
| 2) Beschaffungs- oder Einrichtekosten pro Auftragseinheit | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) konstant} \\ \text{b) variabel} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} \alpha) \text{ stetig} \\ \beta) \text{ unstetig} \end{array} \right.$ | |
| 3) Zins- und Lagerhaltungskosten sowie Lagerrisiken pro Periode | | | |
| 4) Fehlmengenkosten für Bestandsunterschreitungen | | | |
| 5) Bedarf in der Periode | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) bekannt} \\ \text{b) geschätzt} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} \alpha) \text{ konstant} \\ \beta) \text{ variabel} \end{array} \right.$ | |
| 6) Zeitliche Verteilung des Lagerverbrauchs | | | |
| | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) stetig} \\ \text{b) unstetig} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} \alpha) \text{ konstante Verbrauchsrate} \\ \beta) \text{ variable Verbrauchsrate} \end{array} \right.$ | |
| 7) Lieferzeit (Bestellaufschubzeit) oder Fertigungszeit | | | |
| 8) Bestellintervall oder Fertigungsperiode | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) bekannt} \\ \text{b) geschätzt} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} \alpha) \text{ konstant} \\ \beta) \text{ variabel} \end{array} \right.$ | |
| 9) Lagerzugang oder Produktionsausstoß | | | |
| | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) geballt} \\ \text{b) kontinuierlich} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} \alpha) \text{ konstant} \\ \beta) \text{ variabel} \end{array} \right.$ | |
| 10) Zeitliche Verteilung der Lagerzugänge | | | |
| | $\left\{ \begin{array}{l} \text{a) kontinuierlich} \\ \text{b) diskontinuierlich (diskret)} \end{array} \right.$ | $\left\{ \begin{array}{l} \alpha) \text{ konstante Eingangsrate} \\ \beta) \text{ variable Eingangsrate} \end{array} \right.$ | |
| | | | |

1) Fußnote siehe Seite 67

Bei den einzelnen Kombinationen können nun noch zusätzliche Nebenbedingungen wie Erhaltung einer bestimmten Liquidität, die Berücksichtigung von begrenzten Fertigungskapazitäten und Lagermöglichkeiten, Preissprünge und Rabatte einbezogen werden.¹⁾ Treten die Beschränkungen bei Situationen mit mehreren Produkten auf, so wird es notwendig, die beschränkten Mittel zusätzlich zur Lageroptimierung aufzuteilen. Dies geschieht zum Teil unter Verwendung von Linear Programming.

Die Einbeziehung der Lagerorganisation mit den verschiedenen Bestellverfahren²⁾ (Two-Bin-System,³⁾ Constant-Cycling-Ordering,⁴⁾ (s,S)-Policy⁵⁾) ergibt die Beziehung zum "Wann" der Auftragserteilung. Mit der Ausdehnung auf

1) Fußnote von Seite 66:

Vgl. Kern, W.: Optimierungsverfahren in der Ablauforganisation - Gestaltungsmöglichkeiten mit Operations Research. Essen 1967, S. 183/184 bei Bezugnahme auf Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 190

1) Vgl. unsere Ausführung in Teil 2/B/III

2) Etwas abstrakt läßt sich definieren: "Man bezeichnet die Menge derjenigen Größen, von denen die Entscheidung abhängt und die Art, wie die Entscheidung von diesen Größen abhängt, als ein Bestellverfahren." Als abhängige Größen lassen sich z.B. die Beschaffungszeit, die Auftragsgröße, der Sicherheitsbestand und der erwartete Verbrauch beim Two-Bin-System bezeichnen. Jöhnk, M.-D.: Lagerbestandsplanung für ein zyklisches Bestellverfahren. Berichte aus dem Institut für Statistik und Wirtschaftsmathematik der FU Berlin. Hrsg.: Wetzels, W. - Munzer, H. Heft 1. Würzburg 1967, S. 8

3) Vgl. die Beschreibung bei Magee, J.F.: a.a.O., S. 70 - 71

4) Vgl. Magee, J.F.: a.a.O., S. 78 - 80 sowie Jöhnk, M.-D.: Lagerbestandsplanung ..., a.a.O. sowie die zusammenfassenden Ausführungen von Fletcher, A. - Clarke, G.: a.a.O., S. 102 - 109; Winkler, D.: a.a.O., S. 21 - 26

5) Vgl. Dvoretzky, A. - Kiefer, J. - Wolfowitz, J.: On the Optimal Character of the (s,S) Policy in Inventory System. In: Econometrica 1953 (21), S. 586 - 596

die Beachtung von Sicherheitsbeständen ergeben sich weitere interessante Fragestellungen.¹⁾

Für den Fertigungsbereich sei besonders auf die Probleme, die bei mehrstufiger Fertigung, bei Mehrproduktunternehmungen, bei losgrößenabhängigen Fertigungsstückkosten und bei der Berücksichtigung kapazitiver Nebenbedingungen entstehen, hingewiesen.²⁾

Die Lösung der hier nur übersichtsweise angeschnittenen Probleme ist im praktischen Einzelfall oft sehr zeitaufwendig und vielschichtig, so daß die Verwendung eines Computers unumgänglich ist.³⁾ Es lassen sich damit geschlossene Dispositionssysteme aufbauen, bestehend aus Bedarfsrechnung, Mengenoptimierung mit Lagerbuchhaltung und Bestellorganisation.⁴⁾

6. Die Ersatztheorie

Die Ersatztheorie bezieht sich auf zwei wirtschaftliche Gegebenheiten:

- (1) Die Maschinen und sonstigen Ausrüstungen sind einer "Veralterung" dadurch unterworfen, daß verbesserte, schnellere oder billigere Einheiten angeboten werden. Das Problem besteht dann darin, den optimalen Zeitpunkt der Ersetzung und die beste der vorhandenen Ausrüstungen zu wählen. Man spricht hier vom

1) Vgl. unsere Ausführungen im Teil 2/B/IV

2) Vgl. Müller-Merbach, H.: Optimale Losgröße ..., a.a.O., Teil II. In: ADL-Nachrichten 1966 (11), S. 10 - 33

3) Vgl. Faure, R. - Boss, J.-P. - Le Garff, A.: a.a.O., S. 110;
Erdlen, M.: Zur optimalen Lösung von Lagerhaltungsproblemen durch elektronische Datenverarbeitungsanlagen. In: IBM-Form 78103, S. 5

4) Vgl. Müller-Merbach, H.: Optimale Losgröße ..., a.a.O., Teil I, S. 653

- "economic-life and equipment-selection problem".¹⁾
- (2) Die zweite Art der Ersetzung wird durch den Ausfall einzelner Einheiten oder ganzer Einheitsgruppen erforderlich, so etwa bei Glühlampen oder Elektroröhren, elektronischer Bauelemente etc. Das Problem liegt darin, zu bestimmen, ob ein Einzelstück oder eine ganze Gruppe ausgewechselt werden und wann, d.h. in welchen Intervallen, dies geschehen soll.²⁾

Die Bestimmung des Ersetzungszeitpunktes des ersten Falls geschieht durch Bestimmung des Minimums aus

- (a) den Kosten der neuen Einrichtung sowie
- (b) den Kosten für die Erhaltung der Leistungsfähigkeit der alten Einrichtung und

-
- 1) Vgl. Dean, B.V.: Replacement Theory. In: Progress in Operations Research (I) Ed.: Ackoff, L.R., S. 327 - 362, hier S. 330; hierunter fällt natürlich auch der Fall der fortschreitenden Abnutzung einer Anlage.
- 2) Eng verbunden mit dem Problem der Bestimmung des Ersetzungszeitpunktes ist das Problem von Wartung und Reparatur, spezieller das Aufstellen von Wartungs- und Inspektionsplänen und die Planung von Wartungsorganisationen. Wartungspläne können feste Perioden zwischen den Wartungen vorsehen oder sie können nach einem festen Zeitintervall von der letzten Reparatur ab durchgeführt werden. Vgl. Barlow, R.E. - Hunter, L.C.: Reliability Analysis of a One-Unit System. In: JORSA 1961 (9), S. 200 - 208.
- Eine wesentliche Verbesserung der Wartungspläne kann erreicht werden, wenn man aus dem Zustand des Systems Informationen über sein voraussichtliches Funktionieren ableiten kann (Messen des Spannungsabfalls oder der Abnutzung). Vgl. Derman, C.: Optimal Replacement and Maintenance under Markovian Deterioration with Probability Bounds on Failure. In: Mgmt. Sci. 1963 (9), S. 478 - 481 und Klein, M.: Inspection - Maintenance - Replacement Schedules under Markovian Deterioration. In: Mgmt. Sci. 1963 (9), S. 25 - 32.
- Eine etwas andere Zielsetzung hat die Planung von Wartungsorganisationen, wobei die Modelle der Wartungszeitpläne zugrunde liegen. Vgl. Bovaird, R.L.: Characteristics of Optimal Maintenance Policies. In: Mgmt. Sci. 1961 (7), S. 238 - 253

- (c) den durch einen eventuellen Ausfall verursachten Kosten.¹⁾

Unter diese Fragestellung fallen auch alle Investitionsrechnungen, bei deren neuerer Entwicklung sich besonders TERBORGH vom Machinery and Allied Products Institute (MAPI) hervorgetan hat. Weitere Autoren auf diesem Gebiet sind GRANT, DEAN, ORENSTEIN, SMITH, SANDIFORD, BERNHOLTZ, SHELSON, FETTER-GOODMAN, RIFAS, BELLMANN und andere.²⁾

Bei Anlagen mit vollständigem plötzlichen Ausfall bestimmen wir den Ersetzungszeitpunkt als Minimum der Kosten, die

- (a) durch die Einrichtung selbst
- (b) durch den Ausfall und
- (c) durch den Ersatz

entstehen. Hierbei ist auch die Frage zu beantworten, ob einzeln oder gruppenweise ausgewechselt werden soll.³⁾

Bei diesen Überlegungen werden in verstärktem Maße die Ergebnisse der "mathematics of failure"⁴⁾ herangezogen, indem man mit Hilfe von "Sterblichkeitstabellen" die Ausfallwahrscheinlichkeiten zu berechnen sucht.⁵⁾

Die Ersatztheorie, die in ihrer theoretischen Konzeption weitgehend geklärt ist, stößt bei der Verwirklichung in

-
- 1) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 25
 - 2) Vgl. Dean, B.V.: a.a.O., S. 334 - 344 und die dort angegebene Literatur
 - 3) Über die einzelnen Modelle auf diesem Gebiet vergleiche Dean, B.V.: a.a.O., S. 344 - 351
 - 4) Vgl. Dean, B.V.: a.a.O., S. 351 - 358
 - 5) Die erste "life-table" für industrielle Anlagen ist von Alvord 1903 veröffentlicht worden. 1910 gab die New York Telephone Company detaillierte Untersuchungen über die "Lebenserwartungen" von Freiluftleitungen, Erd- und Unterwasserkabel heraus. Vgl. Dean, B.V.: a.a.O., S. 354

der Praxis nicht selten auf Schwierigkeiten bei der Quantifizierung der erforderlichen Daten¹⁾ und kann daher nicht die Bedeutung erlangen, die ihr aufgrund der Wichtigkeit eigentlich zustünde.

7. Die Warteschlangentheorie

Neben dem Gebiet der "Mathematischen Optimierung" und den Lagerhaltungsproblemen zählt die Theorie der Warteschlangen, Stauungen oder Engpässe zu den bedeutendsten Gebieten von Operations Research. Sie besteht allerdings nicht aus einem einzigen Satz mathematischer oder statistischer Formeln, sondern aus einer stetig wachsenden Sammlung von Verfahren und einzelnen Modellen, die sich bei der Lösung praktischer Fälle ergeben haben.²⁾ Leider sind dabei nur die wenigsten Warteschlangenprobleme der Praxis allein mit Hilfe analytischer Methoden lösbar.³⁾

Kennzeichen der Warteschlangentheorie ist die Ermittlung der (ökonomischen) Bestgestaltung von betrieblichen, verkehrstechnischen und sonstigen Engpässen.⁴⁾ Jedes Warteschlangenproblem ist dabei durch folgende Kriterien gekennzeichnet:

- (1) den eintreffenden Einheiten oder Kunden (input),
- (2) dem Engpaß oder den Bedienstungen, welche die Einheiten abfertigen oder entlassen,
- (3) der Warteschlange,

1) Vgl. Albach, H.: Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei unsicheren Erwartungen. Köln - Opladen 1959, S. 72 - 222, der sich mit dem Unsicherheitsphänomen in der Wirtschaftlichkeitsrechnung besonders befaßt.

2) Vgl. Böhm, H.-H.: Operationenforschung - Moderne Vorbereitung ..., a.a.O., S. 93

3) Vgl. Fletcher, A. - Clarke, G.: a.a.O., S. 138

4) Vgl. Kern, W.: Operations Research - Eine Einführung in die Optimierungskunde. Sammlung Poeschel. Stuttgart 1964, S. 63

- (4) dem Output, d.h. mit welcher Rate oder Wahrscheinlichkeit der Engpaß die abgefertigten Kunden entläßt.¹⁾

Dieses Grundmodell ist in den einzelnen Kriterien variierbar und es läßt sich daraus eine Vielzahl von Kombinationen bilden, die die Vielfalt der denkbaren Warteschlangensituationen andeuten.²⁾

(a) Ankunft der Einheiten

Die Ankunft der Einheiten kann

- stationär³⁾ oder zeitabhängig sein;
- stochastisch oder regelmäßig erfolgen;
- sie kann von der Schlangenlänge abhängig sein:
z.B. Warteschlangen vor einem Theater oder Kino, lassen die Vorstellung sehenswert erscheinen;⁴⁾
wartende Autos vor einer Tankstelle führen zur Weiterfahrt;
- beeinflußbar sein; z.B. bestellt der Arzt den Patienten zu einem bestimmten Zeitpunkt;
- die Zwischenankunftszeiten können bestimmten Häufigkeitsverteilungen unterliegen;
- die Menge der potentiellen Kunden kann endlich oder unendlich sein und sie können einzeln oder in Gruppen ankommen;
- der Beginn einer Warteschlange kann von einer unterschiedlich ankommenden Anzahl von Kunden verursacht werden.⁵⁾

1) Vgl. Schneeweiss, H.: Zur Theorie der Warteschlangen. In: ZfhF 1960 (12), S. 471 - 507, hier S. 472

2) Vgl. Schneeweiss, H.: a.a.O., S. 489/490

3) d.h. konstante Ankunftsrate

4) Vgl. Saaty, Th.L.: Elements of Queueing Theory with Applications. New York - Toronto - London 1961, S. 4

5) Vgl. Saaty, Th.L.: a.a.O., S. 9

- (b) Der Eintritt in die Bedienstationsstationen und die Abfertigung
Hier sind ähnliche Verhältnisse wie in (a) möglich.¹⁾

(c) Das Verhalten der Kunden²⁾

Das Verhalten der Kunden kann beim Warten sehr unterschiedlich sein. Sehr deutlich zeigt sich dies manchmal beim Warten im Restaurant. Nicht selten wird aber auch das Kundenverhalten von einer Warteschlangensituation bestimmt:

- man reist früher oder später um das Anstellen zu vermeiden;
- das sich nähernde Schiff fährt langsamer, weil der Kanal verstopft ist;
- trotz einer kürzeren Warteschlange schließt man sich der längeren an, da man fürchten muß, daß die andere Bedienstungsstelle schließt, bevor man bedient wird;
- man läßt sich von der netten Verkäuferin - trotz längerer Wartedauer - lieber bedienen.³⁾

(d) Das Verhalten der Abfertigungsstellen

- Über die einzelnen Abfertigungsstellen kann volle oder beschränkte Verfügbarkeit bestehen. Z.B. läßt sich ein Telefongespräch über weite Strecken erst führen, wenn alle Verbindungsstellen frei sind.
- Die Abfertigung erfolgt nach bestimmten Regeln (first come-first served), Prioritäten (Schwerverletzte beim Arzt) oder nach Zufall.
- Mehrere Abfertigungsstellen bestehen nebeneinander, wobei einzelne Abfertigungsstellen auf bestimmte Kunden spezialisiert sind.

1) Vgl. Schneeweiss, H.: a.a.O., S. 490/491

2) Vgl. Saaty, Th.L.: a.a.O., S. 10

3) Vgl. Fletcher, A. - Clarke, G.: a.a.O., S. 140

(e) Der "Output" aus der Abfertigungsstelle

Er ist dann von besonderer Bedeutung, wenn er wiederum den Input für eine andere Schlange bildet.

Das oben Gesagte sei mit einem von Saaty entwickelten Überblick abschließend noch einmal zusammenfassend und ergänzend dargestellt.¹⁾ Siehe Skizze auf Seite 75.

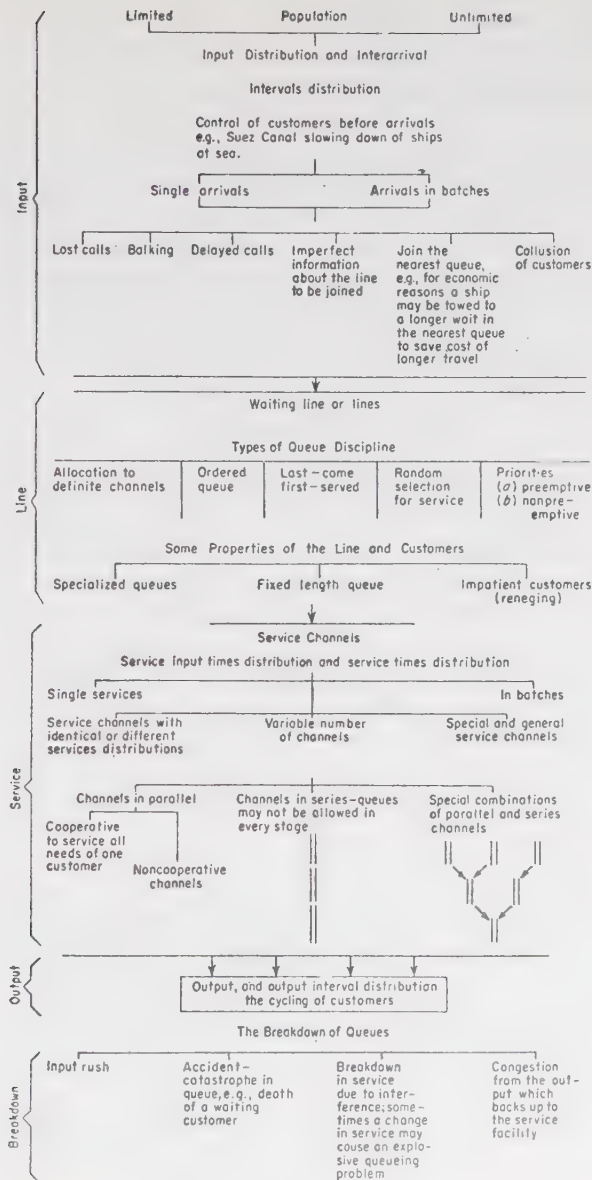
Betriebswirtschaftlich interessant - und darum geht es uns ja in erster Linie - sind bei all diesen Modellen die Kosten, die dadurch entstehen, daß Personen oder Güter durch eine oder mehrere Stellen bedient oder bearbeitet werden und dabei die zu bedienenden Einheiten oder die Bedienungsstellen warten müssen. Die Summe dieser Kosten soll durch die Steuerung des Eintreffens der zu bedienenden Einheiten und die optimale Dimensionierung der Bedienungsstellen möglichst minimiert werden.²⁾

Geschichtlich gehen die Anfänge der Warteschlangentheorie relativ weit zurück. Der dänische Ingenieur ERLANG hat 1909 ein erstes Modell zur Berechnung des Kopenhagener Telefonnetzes entwickelt. Alle folgenden Abhandlungen versuchen nur den Beweis oder die Widerlegung dieses Modells zu erbringen.³⁾ In den 50er Jahren vollzieht sich unter dem Einfluß von Operations Research ein neuer Aufschwung, der - noch nicht abgeschlossen - zur Darstellung immer komplizierterer Warteschlangensituationen führt. Das Schwergewicht der Lösungsmethoden verlagert sich dabei von der analytischen Lösungsmethode zur Simulation. Zur Erleichterung der Klassifikation der Vielzahl möglicher Warteschlangenmodelle hat KENDALL ein

1) Vgl. Saaty, Th.L.: a.a.O., S. 12/13

2) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 24/25

3) Vgl. Saaty, Th.L.: a.a.O., S. 21



Buchstabensystem entwickelt, das sich auch international durchgesetzt hat.¹⁾

8. Experimentelle Verfahren

Ähnlich wie bei physikalischen und chemischen Versuchen führt man in neuerer Zeit auch in den Wirtschaftswissenschaften Experimente mit Hilfe sogenannter Simulationsmodelle durch. Dabei müssen wir vorausschicken, daß eigentlich jede Modellbildung und -lösung "Simulation" in des Wortes allgemeinsten Bedeutung ist, so daß zuerst einmal eine Begriffserklärung notwendig erscheint.

a) Begriff und Wesen der Simulation²⁾

Im Englischen bedeutet nach WEBSTERs Dictionary "simulate" (a) pretend und (b) imitate, resemble. Läßt sich ersteres als das "Vorgeben falscher Tatsachen" ansehen, so versteht man unter letzterem ganz allgemein das Bestreben zur Nachahmung.³⁾ In diesem letzteren Sinne läßt sich dann auch beim Ausprobieren maßstabgerechter Flugzeugmodelle im Windkanal, beim Training von Fliegern und Astronauten von Simulation sprechen. Im Bereich der Wirtschaftswissenschaften würde sich der Begriff Simulation allgemein auf die Modellbildung und -lösung erstrecken.⁴⁾ Dies erscheint uns aber für unsere Zwecke

1) Vgl. das Beispiel bei Fletcher, A. - Clarke, G.: a.a.O., S. 156/157

2) Simulation kann sowohl als Lösungsmethode innerhalb der einzelnen Bereiche des Operations Research als auch als eigenständiger Bereich betrachtet werden.

3) Kenessey, Z.: Die Simulation der Wirtschaftsprozesse und die Makromodelle. In: Mathematik und Kybernetik in der Ökonomie. Internationale Tagung - Berlin, Okt. 1964, Konferenzprotokoll Teil I, Berlin 1965, S. 38 - 55, hier S. 39

4) Vgl. Thomas, C.J. - Deemer, W.L.: The Role of Operational Gaming in Operations Research. In: JORSA 1957 (5), S. 1 - 27, hier S. 4

als zu unbestimmt. Auch der Auffassung einiger Autoren, die die Simulation nur auf die Behandlung stochastischer Problemstellungen bezogen wissen wollen, können wir nicht zustimmen, obwohl dieser Aspekt zweifelsohne mit einzubeziehen ist.¹⁾

Unter Simulation versteht NEUMANN²⁾ in Anlehnung an JACKSON ein Verfahren, das die wesentlichen Bestandteile komplexerer Systeme physikalisch oder mathematisch nachbildet, um die so erhaltenen Modelle anstelle der ursprünglichen Systeme experimentell zu untersuchen. KOLLER³⁾ definiert Simulation als die "Berechnung von alternativen möglichen Einzelfällen eines Entscheidungsmodells" und beschränkt sich damit auf die mathematischen Entscheidungsmodelle unter Ausschluß von Erklärungs- und Verifikationsmodellen und der physikalischen Modelle mit Hilfe eines Analogrechners.⁴⁾ Obwohl KOLLER mit dieser Definition das heute wichtigste Simulationsgebiet erfaßt hat, wollen wir für unseren Überblick im folgenden die allgemeinere Definition von NEUMANN zugrundelegen.⁵⁾

Der wesentliche Unterschied zu den bisher behandelten Optimierungsverfahren liegt darin, daß bei der Simulation ein gesuchtes Optimum für eine gegebene Datenkon-

-
- 1) Vgl. Harling, J.: Simulation Techniques in Operations Research - A Review. In: JORSA 1958 (6), S. 307 - 319, hier S. 307;
Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S.62;
Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 29
 - 2) Vgl. Neumann, Th.: Der elektronische Analogrechner ... a.a.O., S. 150
 - 3) Vgl. Koller, H.: Simulation als Methode der Betriebswirtschaft. In: ZfB 1966 (36), S. 95 - 110, hier S. 99
 - 4) Man spricht hier auch von "analog simulation" und, im Gegensatz dazu, bei Untersuchungen mit mathematischen Modellen von "digital simulation".
 - 5) Vgl. vor allem die Anwendungsmöglichkeiten der Simulation mit Hilfe eines Analogrechners bei Neumann, Th.: a.a.O., S. 151 - 179

stellation nicht automatisch, sondern experimentell und nur näherungsweise gefunden wird.¹⁾ An die Stelle der direkten Frage nach der "besten" Lösung bei der analytischen Methode tritt hier das Berechnungsexperiment oder allgemein das Experiment mit der Frage "Was ist, wenn?". Es wird nach den Auswirkungen alternativ möglicher Konstellationen der Aktionsparameter gefragt. Die Ergebnisse werden im Hinblick auf die Zielvorstellung miteinander verglichen.²⁾

b) Arten der Simulation

Die Fülle möglicher Simulationsmodelle läßt sich nach verschiedenen Gesichtspunkten gliedern. Nach der Verwendung eines Digital- oder Analogrechners unterscheidet man nach "analog simulation" und "digital simulation".

Innerhalb des engeren Begriffes der Simulation, der sich nur auf mathematische Entscheidungsmodelle bezieht, läßt sich im Hinblick auf die Auswahl der zu berechnenden Einzelfälle von kombinatorischer Simulation sprechen, wenn man alle Zahlenkombinationen der unabhängigen Variablen systematisch durchrechnet. Bei dieser totalen Suche erhalten wir durch einfachen Vergleich aller möglichen Lösungen auch die absolut beste. Die Grenzen dieser kombinatorischen Simulation in der praktischen Anwendung sind offensichtlich.³⁾ Wird aus der Gesamtheit

1) Vgl. Neumann, Th.: a.a.O., S. 150. Von der Lösungsmethode her dürfte eine genaue Abgrenzung zwischen "üblichen" Lösungsmethoden und Simulation schwierig sein. Es gibt kein Kriterium, das bestimmt, wann die Verwendung der Monte-Carlo-Technik in Verbindung etwa mit Iterationsverfahren als Simulation zu betrachten ist und wann sie noch "übliche" Lösungsmethoden darstellt. Eine Trennung in analytische Lösungsmethode und Simulation wäre zu bevorzugen.

2) Vgl. Koller, H.: a.a.O., S. 99

3) Vgl. Koller, H.: a.a.O., S. 102/103. Mit steigender
Fortsetzung siehe Seite 79

der möglichen Einzelfälle eine bestimmte Anzahl ausgewählt und durchgerechnet, so kann man von Stichprobensimulation sprechen. Zur Auswahl benutzt man üblicherweise die Monte-Carlo-Technik.¹⁾ Sie bezieht sich nur auf die Erzeugung von Zufallsprozessen²⁾ bei der Auswahl von Einzelfällen. Ihre Anwendung beschränkt sich nicht nur auf die Anwendung bei stochastischen Modellen, sondern ist auch bei deterministischen Modellen denkbar.³⁾ Es ist auch möglich, daß die Auswahl der zu berechnenden Einzelfälle nicht durch einen Rechenprozeß, sondern durch den Experimentierenden selbst vollzogen wird. Aufgrund seines Wissens und seiner Erfahrung wird er bestimmte Einzelfälle berechnen und dann nach der Analyse der Ergebnisse durch gezielte Veränderung der unabhängigen Variablen versuchen, das Ergebnis weiter zu verbessern. Man spricht hier von heuristischer Simulation.⁴⁾ Es fehlt hier natürlich ein absolutes Optimalitätskriterium.

Eine weitere Unterscheidung ergibt sich nach der Art der Verwendung von Simulationsmodellen.⁵⁾ Bei der syntneti-

3) Fortsetzung von Seite 78:

Anzahl der Variablen wächst die Anzahl der Kombinationen so stark, daß selbst große Rechenanlagen diese nicht mehr in angemessener Zeit und mit vertretbarem Aufwand bewältigen können.

1) Vgl. Beschreibung in Teil 2/D/III/4

2) Über Einzelheiten vergleiche Morgenthaler, G.W.: The Theory and Application of Simulation in Operations Research. In: Progress in Operations Research. Vol. I. Hrsg.: Ackoff, R.L. New York - London 1961, S. 363 - 419, hier S. 387 - 392

3) Vgl. Faure, R. - Boss, J.-P. - Le Garff, A.: a.a.O., S. 80; beispielsweise verwendet man die Monte-Carlo-Technik zur Integration von Funktionen, für die es keine direkte Methode gibt. Siehe Kay, E.: Wesen und Grenzen der Simulation. In: Ablauf- und Planungsforschung 1963 (4), S. 191 - 194, hier S. 192

4) Vgl. Koller, H.: a.a.O., S. 103

5) Vgl. Koller, H.: a.a.O., S. 105

schen Simulation soll das Gesamtverhalten eines komplexen Modells untersucht werden, das durch Interaktion von mehreren, genau bekannten und beschriebenen Teilkomponenten des Modells zustande kommt.¹⁾ Der umgekehrte Fall liegt vor, wenn zunächst nur das Verhalten des realen Gesamtsystems beobachtet werden kann, ohne daß die einzelnen Modellkomponenten und ihr Zusammenhang bekannt sind. Das Problem besteht in der Konstruktion eines Simulationsmodells, das sich wie das abgebildete Gesamtsystem verhält. Hier spricht man dann von analytischer Simulation.²⁾

Wird ein Simulationsmodell zu Ausbildungszwecken³⁾ verwendet, dann nennt man dies Business Simulation oder Business Game. Business Simulation - deutsch Planspiel - kann als "a sequential decisionmaking exercise structured around a model of a business operation, in which participants assume the role of managing the simulated operation"⁴⁾ bezeichnet werden. Von diesem "Business Game" muß die sogenannte Spieltheorie (Theory of Games) unterschieden werden, als "a highly complex theoretical branch of mathematics"⁵⁾. Planspiele⁶⁾ bedienen sich der Methode der Simulation, indem die Reaktionsseite das Simulations-

1) Hier spricht man auch von taktischer Simulation.

2) Vgl. Koller, H.: a.a.O., S. 105

3) "A game is a simulation exercise with a training model". Deacon, A.R.L. jun.: Some Explanatory Notes and Guides for the General Reader, In: AMA Management Report No 55, Simulation and Gaming: A Symposium, New York 1961, S. 5 - 7, hier S. 6

4) Vgl. Greenlaw, P.S. - Herron, L.W. - Rawdon, R.H.: Business Simulation in Industrial and University Education. Englewood Cliffs, N.J. 1962, S. 5

5) Vgl. Greenlaw, P.S. - Herron, L.W. - Rawdon, R.H.: Business Simulation ..., a.a.O., S. 6

6) Vgl. Sieber, E.: Das Planspiel unternehmerischer Entscheidungen. In: Betriebsführung und Operations Research. Hrsg.: Angermann, A. Frankfurt/M. 1963, S. 80 - 123, besonders S. 80/81

modell bildet, die Aktionsseite aber durch die Spieler dargestellt wird.¹⁾ Dabei läßt sich unterteilen in:

- "Manual" (non-computer) und Computer Game;
- "Functional Games", die sich mit den taktischen Entscheidungen einzelner Teilbereiche befassen und
- "Top Management Simulation", auch "General Management Games" genannt, die die strategischen Entscheidungen - die zeitliche und sachliche Koordination von Absatz-, Preis- und Investitionspolitik - behandeln;
- in Interaktionsmodelle, die Entscheidungen aller Gruppen greifen ineinander, und isolierte Modelle, bei denen die Entscheidungen der Untergruppen keinen gegenseitigen Einfluß haben.²⁾

c) Durchführung der Simulation

Die Durchführung der Simulation erfolgt in zwei Schritten. Das zu untersuchende Problem wird zunächst in einem Simulationsmodell als System von Gleichungen und Ungleichungen oder mit Hilfe eines Analogrechners formuliert. Im zweiten Schritt werden damit dann Berechnungsexperimente durch Berechnung von alternativen Einzelfällen durchgeführt. Die Lösung eines mathematischen Simulationsmodells kann grundsätzlich mit Papier und Bleistift erfolgen, doch nimmt in den meisten Fällen die Anzahl der notwendigen Rechengänge einen so großen Umfang an, daß sich nur sehr einfache Aufgaben wirtschaftlich mit dieser Verfahrenstechnik bearbeiten lassen. Kompliziertere Probleme erfordern zur wirtschaftlichen Berechnung immer den Einsatz elektronischer Rechanlagen.³⁾

1) Vgl. Neumann, Th.: a.a.O., S. 149

2) Vgl. Bleicher, K.: Entscheidungssimulation und Unternehmungsspiele. In: ZfB 1962 (32), S. 15 - 30, hier S. 21 - 23

3) Ein großer Teil der Literatur versteht unter Simulation ausschließlich die Methode der "Computer Simulation".

Mit ihnen wird die Schnelligkeit, Sicherheit und Genauigkeit der Lösungsermittlung wesentlich gesteigert. Allerdings tritt dabei ein besonders hoher Zeitaufwand für die maschinengerechte Formulierung des Simulationsmodells auf, den man durch die Entwicklung spezieller Programmiersprachen für die Simulation soweit als möglich zu vermindern sucht.¹⁾ So sind etwa durch die Forschungsgruppe unter FORRESTER die Programmiersprache DYNAMO²⁾, durch die RAND Corporation das SIMSCRIPT³⁾ und durch IBM GPSS⁴⁾ entwickelt worden. Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer spezieller Programmiersprachen mit problemorientierter Anwendung.⁵⁾

In der betrieblichen Praxis findet Simulation meist dann Anwendung, wenn für die Optimierung keine entsprechenden analytischen Verfahren verfügbar sind.⁶⁾ Meist handelt es sich um nichtlineare, dynamische Modelle mit zusätzlich stochastischen Elementen. Schlagwortartig sei an dieser Stelle nur auf Warteschlangen-, Reihenfolge- und Zuordnungsprobleme bei der Fließbandbelegung und der Fertigungsplanung⁷⁾ bzw. -steuerung beim Werkstattensy-

-
- 1) Bei der analytischen Simulation liegt eine oftmalige Modell- und damit Programmänderung im Wesen dieser Simulationsart, wobei dann eine flexible Programmiersprache besonders wünschenswert erscheint.
 - 2) Vgl. Pugh, A.L.: Dynamo User's Manual. Cambridge 1961
 - 3) Vgl. Markowitz, H.M. - Hausner, B. - Karr, H.W.: SIMSCRIPT: A Simulation Programming Language. Englewood Cliffs, N.J. 1963
 - 4) Vgl. General Purpose Systems Simulator III - User's Manual. IBM Application Program Form H 20 -0163-1 und Heil, H.: Simulation in der Datenverarbeitung - Der GPSS General Purpose Systems Simulator. In: IBM-Nachrichten 1966 (16), S. 281 - 286
 - 5) Vgl. Koller, H.: a.a.O., S. 108
 - 6) Vgl. Angermann, A.: a.a.O., S. 267
 - 7) Vgl. Baker, C.T. - Zielinski, B.P.: Simulation of a Simplified Job Shop. In: Mgmt. Sci. 1960 (6), S. 311 - 323, hier S. 315 ff.
Rowe, A.J.: Toward a Theory of Scheduling. In: J. Ind. Engng. 1960 (11), S. 125 - 136, besonders S. 132 - 135

stem sowie auf Lagerhaltungsprobleme¹⁾ und Verkehrsprobleme²⁾ hingewiesen, die besonders mittels Simulation gelöst worden sind.

B) Fertigung und Operations Research

=====

I. Aufgaben der Fertigung

Nachdem wir im vorangegangenen Kapitel einen kurzen Überblick über die verschiedenen Gebiete von Operations Research gegeben haben, wollen wir im folgenden die Anwendungsmöglichkeiten operationsanalytischer Verfahren innerhalb der Fertigung kurz darstellen. Unsere Aufmerksamkeit gilt dabei besonders den Planungsproblemen der Fertigung, die vom Wirtschaftler unter dem Gesichtspunkt des ökonomischen Prinzips bearbeitet werden.³⁾ Die Ausführung des Planes mit den Mitteln der Technik, also die Produktion im engeren oder eigentlichen Sinne, soll dabei außer Betracht bleiben.⁴⁾ Im einzelnen werden wir die Probleme der Fertigung immer nur im Hinblick auf eine operationsanalytische Anwendung behandeln.

1) Vgl. Popp, W.: Simulationstechnik bei Lagerplanung mit stochastischer Nachfrage. In: Ufo 1963 (7), S. 65 - 74

2) Vgl. Jennings, N.H. - Dickins, J.H.: Computer Simulation of Peak Hour Operations in a Bus Terminal. In: Mgmt. Sci. 1958 (5), S. 106 - 120; Boss, J.-P.: Simulation des Verkehrs auf einer Autobuslinie. In: Ablauf- und Planungsforschung 1961 (2), S. 234 - 237

3) Vgl. Beste, Th.: Fertigungswirtschaft und Beschaffungswesen. In: HdW, Bd. 1. Hrsg.: Hax, K. - Wessels, Th. Köln - Opladen 1958, S. 125 - 297, hier S. 129

4) Vgl. Schäfer, E.: Die Unternehmung. 4. Aufl. Köln - Opladen 1961, S. 171

1. Abgrenzung des Sachproblems

Bevor wir uns näheren Einzelheiten widmen, wollen wir das zu behandelnde Problem innerhalb der einzelnen ökonomischen Funktionen näher bezeichnen. An Grundfunktionen lassen sich dabei nach Schäfer¹⁾ unterscheiden:²⁾

- (1) Die Beschaffung oder der Einkauf;
- (2) die Produktion (im weitesten Sinne als Schaffung einer neuen Sache oder Leistung);
- (3) die Lagerung (Vorratshaltung), und zwar teils vor, teils nach der Produktion;
- (4) der Absatz oder die laufende Veräußerung der geschaffenen Waren oder Leistungen;
- (5) die laufende Finanzierung.

Zweckmäßigerweise wollen wir die Produktions- und Lagerungsfunktion zu einer einzigen Funktion - der Fertigstellungsfunktion³⁾ - zusammenfassen. Der von uns zu behandelnde Fertigungsbereich beginnt also beim Rohmateriallager und endet beim Fertigwarenlager.⁴⁾ Innerhalb dieser Fertigstellungsfunktion interessiert uns nicht, wie oben schon angedeutet, die Produktion im engeren oder eigentlichen Sinne - die reine Produktionsdurchführung - son-

1) Vgl. Schäfer, E.: Die Unternehmung. a.a.O., S. 168

2) Zur Funktionalbetrachtung in der Betriebswirtschaftslehre vgl. Becker, J.: Die unternehmerischen Entscheidungen als Gegenstand der Betriebswirtschaftslehre. Diss. Nürnberg 1966, S. 49 - 79 und vor allem Schäfer, E.: Die Funktionalbetrachtung in der Betriebswirtschaftslehre. In: Gegenwartsprobleme der Betriebswirtschaft. Festschrift für le Coutre, W.: Hrsg.: Henzel, F. Baden-Baden - Frankfurt 1955, S. 11 - 24

3) Wir gebrauchen hier den Begriff "Fertigung" ohne nähere Abgrenzung als den umfassenderen gegenüber dem Produktionsbegriff.

4) Wir vergessen dabei nicht, daß diese Fertigstellungsfunktion nie völlig unabhängig von den anderen Funktionen, speziell der Absatzfunktion, zu betrachten ist.

dern die davor liegende Tätigkeit der Planung,^{1) 2)} auch Arbeitsvorbereitung oder besser Fertigungsverfahren³⁾ - in Verbindung mit der Fertigungssteuerung⁴⁾ - genannt.⁵⁾

-
- 1) "Man kann Planung geradezu definieren als "Entwerfen einer Ordnung, nach der sich bestimmte Vorgänge vollziehen sollen (im Text gesperrt - d.Verf.)." Planung ist demnach zunächst Vorwegnahme einer künftigen Form des Ablaufes bestimmter Geschehnisse." Gutenberg, E.: Planung im Betrieb. In: ZfB 1952 (22), S. 669 - 684, hier S. 671.
Über den Begriff vgl. weiter Weber, H.: Die Planung in der Unternehmung. Nürnberger Abhandlungen zu den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Heft 19. Berlin 1963, S. 27 - 37
 - 2) Wir wollen damit nicht andeuten, daß die Fertigungsplanung der Ausgangspunkt jedweder Planung ist. Vgl. Ellinger, Th.: Ablaufplanung - Grundfragen der Planung des zeitlichen Ablaufs der Fertigung im Rahmen der industriellen Produktionsplanung. Stuttgart 1959, S. 12. Vielmehr herrscht zwischen den einzelnen Planungsbereichen eine starke Interdependenz, wobei man nicht allgemein gültig angeben kann, von welchem Bereich die entscheidenden Impulse für die Planung ausgehen, da der jeweilige Minimumsektor den Anstoß gibt. Vgl. Gutenberg, E.: Planung ..., a.a.O., S. 674
 - 3) Vgl. Beste, Th.: Fertigungswirtschaft und Beschaffungswesen. In: HdW, Bd. 1. Köln - Opladen 1958, S. 125 - 298, hier S. 204;
Mellerowicz, K.: Betriebswirtschaftslehre der Industrie. Freiburg i.Br. 1958, Bd. 2, 5. Aufl., S. 212/213 und
Eicke, K.: Auftragsvorbereitung im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Organisation. Frankfurt 1952, S. 5
 - 4) Die Fertigungssteuerung ist fast ausschließlich organisatorischer Struktur und nur über die Schaffung neuer Tatsachen (Soll-Ist-Vergleich) operationsanalytisch von Bedeutung. Vgl. Bussmann, K.F.: Fertigungsplanung. In: HWB, 3. Aufl., Bd. 1. Sp. 1742 - 49. Stuttgart 1956, Sp. 1743
 - 5) Eine Zusammenfassung über die verschiedenen Auffassungen der Begriffe Arbeitsvorbereitung, Fertigungsvorbereitung, Fertigungsplanung, Fertigungsablaufplanung und Fertigungssteuerung findet sich bei Hartmann, B.: Betriebswirtschaftliche Grundlagen der automatisierten Datenverarbeitung. Freiburg i.Br. 1961, S. 117/118

2. Aufgaben der Fertigungsplanung

Die Aufgaben der Fertigungsplanung seien im folgenden in Anlehnung an HOSS¹⁾ ohne nähere Erläuterung schlagwortartig dargestellt.²⁾ Sie werden im Laufe unserer Ausführungen im Hinblick auf ihre operationsanalytische Anwendung zu präzisieren sein:

(1) Einleitung der Fertigungsplanung durch Fertigungsprogrammplanung im weiteren Sinn:

- a) Fertigungsprogrammplanung im engeren Sinn,
- b) Losgrößen- und Auflagegrößenbestimmung,
- c) Konstruktion und Stücklistenausfertigung.*

(2) Fertigungsablaufplanung

- a) Planung der Arbeitsgänge, -verfahren und der technologischen Bearbeitungsfolgen,
- b) Arbeitszeitermittlung und -vorgabe,³⁾*
- c) Termingrobplanung
- d) Durchlaufzeitbestimmung } Terminplanung
- e) Auftragsfolgenbestimmung
- f) Planung der Zwischenlager
- g) Transportplanung
- h) kurzfristige Terminplanung (Terminfeinplanung)
- i) Maschinenbesetzungsplanung

(3) Bereitstellungsplanung

der Betriebsmittel und Maschinen, der Arbeitskräfte und der Werkstoffe.

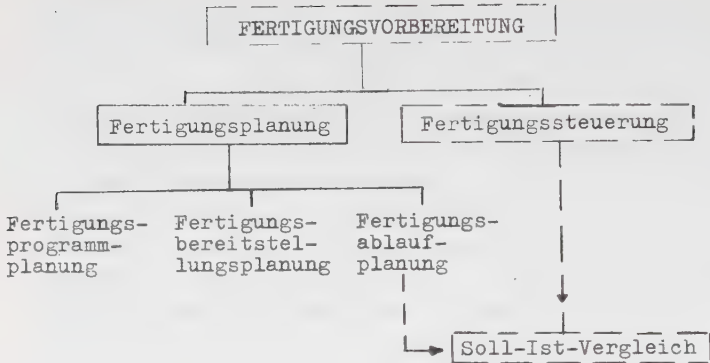
1) Vgl. Hoss, K.: Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden unter besonderer Berücksichtigung des Ablaufplanungsdilemmas in der Werkstattfertigung. Würzburg - Wien 1965, S. 7/8

2) Die auch zur Fertigungsplanung zählende Planung der Produkte soll hier, da vom operationsanalytischen Standpunkt aus uninteressant, außer Betracht bleiben. Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 14

3) Gehen als Daten in die Fertigungsablaufplanung ein.

Die Fertigungsplanung umschließt auch längerfristige Planungen über Produktionsmengen, wie sie beim sogenannten "production smoothing problem" auftreten, neben den kürzerfristigen Mengen- und Artenplanungen des Produktionsprogramms. Zusammen mit dem Terminwesen ergibt sich als Fertigungsplanung das, was Kalveram als "die der eigentlichen Fertigung und ihren wechselnden Gestaltungen vorangehenden Überlegungen zur Festlegung der Bearbeitungs- und Bewegungsvorgänge, unter denen die Bestimmung des zeitlichen Ablaufs der Arbeiten eine besonders wichtige Rolle spielt", ¹⁾ bezeichnet. Es wird sich zeigen, daß die oben angegebenen Einzelaufgaben zum Großteil der Anwendung operationsanalytischer Verfahren zugänglich sind, wenn man hierbei die rein organisatorischen und technischen Aufgaben außer Betracht läßt. Diese im folgenden unbeachtlichen Einzelaufgaben haben wir mit * gekennzeichnet. Die an die Fertigungsplanung anschließende Fertigungssteuerung ist wegen ihrer fast ausschließlich organisatorischen Natur operationsanalytischen Verfahren wenig zugänglich. Hierbei findet vor allem die Kybernetik ²⁾ als neues Forschungsgebiet Anwendung. Das oben Dargestellte sei noch einmal an Hand eines zusammenfassenden Schemas aufgezeigt. ³⁾

-
- 1) Kalveram, W.: Industriebetriebslehre. 7. Aufl. Wiesbaden 1960, S. 281
 - 2) Vgl. Strnad, H.: Die Steuerung industrieller Fertigung in kybernetischer Sicht unter besonderer Berücksichtigung von Störeinflüssen. Diss. Darmstadt 1963, S. 60 - 157 und Beer, St.: What has Cybernetics to do with Operational Research. In: Operat. Res. Quarterly 1959 (10), S.1 - 21, besonders die Abgrenzung zwischen Kybernetik und Operations Research (S. 17 - 21)
 - 3) Vgl. Hoss, K.: Fertigungsablaufplanung ..., a.a.O., S. 7



3. Das Verhältnis der Einzelaufgaben der Fertigungsplanung und die Stellung innerhalb des Gesamtplanungssystems¹⁾

Betrachten wir die Aufgaben der Fertigungsplanung im einzelnen, so besteht zwischen diesen und im Verhältnis zu anderen Teilplänen ein funktionaler, teilweise interdependenter Zusammenhang. Zunächst hat sich die Fertigungsprogrammplanung an der Absatzplanung zu orientieren. In die Absatzplanung müssen aber umgekehrt die "betrieblichen Bedingungen kapazitätsmäßiger, finanzieller und beschaffungswirtschaftlicher Art"²⁾ einbezogen werden. Es muß allerdings nicht so sein, daß dabei der Absatzplan unbedingt der Primärplan ist. Es kann jeder andere Teil- oder Unterplan gemäß der "Dominanz des Mini-

1) Die Betriebsaufbauplanung (Grochla) bzw. Strukturplanung (Mellerowicz) soll hier außer Betracht bleiben; wir beziehen uns nur auf laufende Planungen einer schon bestehenden Unternehmung. Vgl. Grochla, E.: Betrieb und Wirtschaftsordnung, Berlin 1954, S. 16 - 17 und Mellerowicz, K.: Planung und Plankostenrechnung. Bd. 1. Freiburg i.Br. 1961, S. 46

2) Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., S. 163

mumsektors" ¹⁾ an seine Stelle treten. ²⁾ Im Rahmen der linearen Programmplanung ³⁾ hat somit auch, wie noch zu zeigen sein wird, die derzeitige oder zukünftige Kapazitätsbelastung Berücksichtigung zu finden, um die Planung des Sortiments nach Art und Menge festlegen zu können. Optimierungsziel ist hierbei die Gewinnmaximierung bzw. Kostenminimierung. Zwischen Verkaufs- und Fertigungsprogramm herrscht nicht selten eine Diskrepanz, die dadurch bestimmt wird, daß fertigungstechnische Aspekte in die Planung einbezogen werden müssen. Die Forderung nach einer möglichst konstanten Auslastung der Produktionskapazitäten spielt hierbei eine große Rolle, was besonders bei schwankendem Absatz Schwierigkeiten bereiten kann. ⁴⁾ Beim marktorientierten ⁵⁾ - im Gegensatz zum auftragsorientierten - Unternehmen kommt der Lagerhaltung ⁶⁾ von Fertigungserzeugnissen eine entscheidende Rolle zu. Das Fertigwarenlager besitzt hierbei eine Ausgleichsfunktion, um eine Loslösung der Produktions- vom Absatzverlauf zu ermöglichen. Wie weit dies geschieht, ergibt sich aus dem Vergleich von Auflegungs- und Lagerkosten. ⁷⁾ Demgegenüber besteht für die nur auftragsorientierten

-
- 1) Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., S. 163
 - 2) Vgl. Danner, D.: Die Ablaufplanung mehrstufiger diskontinuierlicher Prozesse. Diss. Mannheim 1963, S. 5
 - 3) Von linearer Programmplanung wollen wir bei der Verwendung von Linear Programming zur Programmplanung sprechen.
 - 4) Vgl. dazu unsere Ausführungen in Teil 2/II/4 dieser Arbeit.
 - 5) Die Terminologie ist nicht ganz glücklich, da beide Unternehmen für den Markt produzieren, das eine für einen anonymen Markt, das andere "nach Auftrag" für einen bestimmten Abnehmer.
 - 6) Vgl. Kaps, H.: Die Bedeutung der Lagerhaltung für die Produktionsplanung in Industriebetrieben. Diss. TH Aachen 1964, S. 22 - 52, der dieses Problem zusammenfassend behandelt.
 - 7) Beachte unsere Ausführungen über "production smoothing" in Teil 1/A/III/5 (Lagerhaltungstheorie)

Unternehmen die Möglichkeit der ausgleichenden Lagerhaltung nicht. Das besondere Problem besteht hierbei in der Ermittlung bestimmter Liefertermine für die einzelnen Kundenbestellungen in Erfüllung des vorgegebenen Fertigungsprogramms. Hierbei handelt es sich allerdings schon um ein Problem der Ablaufplanung.¹⁾ Die Festlegung der Zusammensetzung des Fertigungsprogramms bildet unter Berücksichtigung der Starttermine der Fertigungsaufträge die Grundlage zur Bestimmung der wirtschaftlichen Auflagen- und Losgröße.²⁾

Mit dem festgelegten Fertigungsprogramm ergibt sich auch der Ausgangspunkt für die sogenannte Vollzugsplanung mit Fertigungsablauf- und Bereitstellungsplanung. Zwischen diesen Teilbereichen bestehen wiederum enge wechselseitige Beziehungen. So wird einerseits die Planung der termingerechten Bereitstellung der für die Durchführung der Fertigungsprogramme erforderlichen Produktionsfaktoren in hohem Maße von den Ergebnissen der Ablaufplanung beeinflusst, da diese erst die zeitliche Ordnung für den Einsatz der Produktionsfaktoren bestimmt, andererseits setzt die Planung des Ablaufs die Bereitstellung der Produktionsfaktoren voraus.³⁾

Die Ergebnisse der Fertigungsablauf- und Bereitstellungsplanung werden als Plandaten von der Fertigungssteuerung übernommen, die für die möglichst genaue Durchführung des gesamten Fertigungsablaufs und der Be-

1) Vgl. Ellinger, Th.: 'Ablaufplanung - Grundfragen ...', a.a.O., S. 107 - 127

2) Die Bestimmung der Losgröße ist ein Teilproblem aus dem Gesamtkomplex Losdimensionierung, der weiter die Lossequenz und u.U. die Losfolge umfaßt.
Vgl. Teil 1/B/III/1

3) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 11

reitestellung zu sorgen hat.^{1) 2)}

Da der funktionale Zusammenhang zwischen den verschiedenen Planungsbereichen im Einzelfall durch die Besonderheiten des Fertigungssystems variiert werden kann, gehen wir im Kapitel Fertigungsablaufplanung darauf näher ein.

Um über das Gesagte und das im folgenden noch Darzustellende einen Überblick zu schaffen, besonders auch über die Verwendung von Operations Research in den einzelnen Planungsbereichen, wollen wir die Zusammenhänge in Form eines Schemas (siehe Seite 92) wiedergeben.³⁾

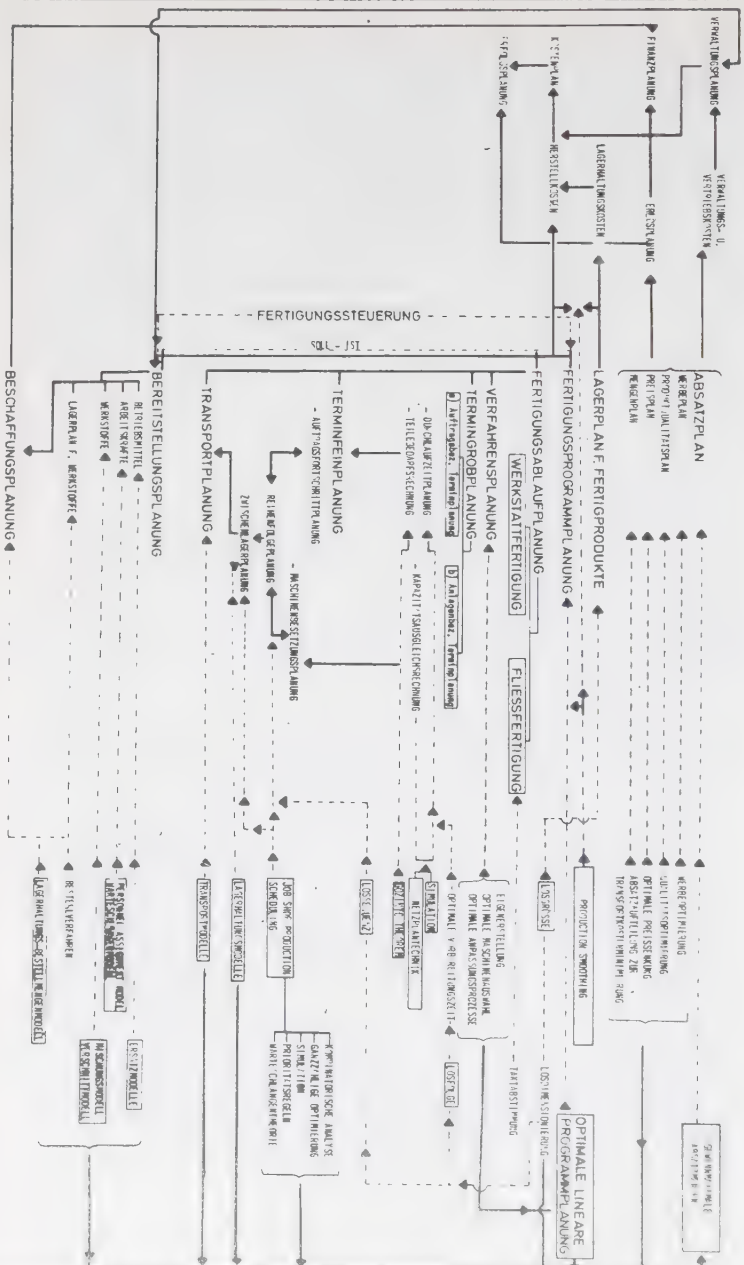
II. Strukturierung des Fertigungsprogramms

1. Der Begriff des industriellen Fertigungsprogramms

"Das Produktionsprogramm eines Unternehmens gibt an, welche Erzeugnisarten und -mengen innerhalb einer Pe-

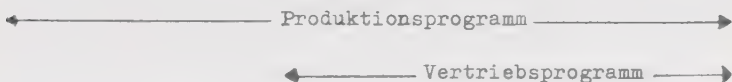
-
- 1) Dabei treten natürlich durch Betriebsstörungen und Planungsfehler Abweichungen des Istzustandes vom Sollzustand auf. Eine informatorische Rückkoppelung zur Vollzugsplanung (Ablauf- und Bereitstellungsplanung) soll eine Abstimmung bewerkstelligen.
 - 2) Auf eine Darstellung der zeitlichen Folge der einzelnen Planungsschritte soll hier noch verzichtet werden. Allgemein läßt sich dazu feststellen, daß sie von langfristigen Fertigungsprogrammüberlegungen über eine mittelfristige Terminplanung (Termingrobplanung) bis zur Maschinenbesetzungsplanung (Terminfeinplanung) führen sollte. Dabei ergeben sich im einzelnen aber Unterschiede bei den verschiedenen Fertigungssystemen.
 - 3) Das Schema ist nach Überlegungen bei Kilger, W.: Planungsrechnung und Entscheidungsmodelle des Operations Research. In: AGPLAN: Unternehmungsplanung als Instrument der Unternehmensführung. Bd. 9, S. 55 - 75, hier S. 61 und Hoss, K.: a.a.O., S. 83 und eigenen Vorstellungen entwickelt worden.

Downloaded from <http://ajph.org/> on November 10, 2015



riode hergestellt werden."¹⁾ Wir wollen diesen Begriff als Überbegriff verwenden und darin die Gesamtheit produktiver Leistungen der Unternehmung verstehen, unter Einschluß der innerbetrieblichen Leistungen und der zur Vervollständigung des Vertriebsprogrammes dienenden Handelswaren.²⁾ Das Fertigungsprogramm ergibt sich dann nach Absonderung der innerbetrieblichen Leistungen und der Handelswaren. Der Begriff ist demnach nur auf Industrie- und Handelsunternehmungen anwendbar. Zur Erklärung soll die folgende zeichnerische Übersicht dienen.

Interne Leistungen	FERTIGUNGSPROGRAMM	Handelswaren
--------------------	--------------------	--------------



2. Das Problem der Programmgestaltung^{3) 4)}

Das Problem der Programmgestaltung tritt das erste Mal bei der Unternehmensgründung auf und wird dort durch die Branchenzugehörigkeit, die Art und den Umfang der einzu-

1) Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., S. 432

2) Vgl. hierzu auch die Definitionen bei Abromeit, G.: Erzeugnisplanung und Produktionsprogramm im Lichte der Produktions-, Absatz- und Wettbewerbspolitik. Wiesbaden 1955, S. 34; Beste, Th.: Fertigungsprogramm. In: HWB, 3. Aufl. Bd. 1, Stuttgart 1956, Sp. 1749 - 1756, hier Sp. 1750; Dean, J.: Managerial Economics. New York 1951, S. 114; Hax, H.: Die Gestaltung des Fertigungsprogramms unter Berücksichtigung produktionswirtschaftlicher und absatzwirtschaftlicher Faktoren. In: BFuP 1958 (10), S. 498 - 517, hier S. 498

3) Vgl. Zimmermann, W.: Modellanalytische Verfahren ..., a.a.O., S. 16/17

4) Wir bleiben uns, trotz der getrennten Benandlung, bewußt, daß die Fertigungsplanung nur im simultanen Zusammenwirken von Programm- und Vollzugsplanung vollzogen werden sollte.

setzenden Fertigungsapparatur sowie die anwendbaren technologischen Verfahrensweisen bestimmt. Damit sind Daten gegeben, die sich bei der einmal tätigen Unternehmung kurzfristig nicht verändern und die vor allem nach Art und Umfang der Fertigungskapazität bei unseren weiteren Überlegungen als kurzfristig unveränderlich angenommen werden.¹⁾

Die Planung des jeweiligen Fertigungsprogramms vollzieht sich kurzfristig, in der Art, daß innerhalb des gegebenen Entscheidungsrahmens der vorhandenen Fertigungskapazität die herzustellenden Produkte art- und mengenmäßig bestimmt werden, wobei auch über diejenigen zu entscheiden ist, die neu in das Programm aufzunehmen oder aus dem alten Programm auszuschneiden sind.

a) Qualitative Überlegungen bei der Programmgestaltung

Jede Umgestaltung des Fertigungsprogrammes erfolgt unter Berücksichtigung der im Betrieb vorhandenen Gegebenheiten. Unter diesem Gesichtspunkt läßt sich die Programmgestaltung als Ergänzungsproblem auffassen.²⁾ Gestaltungsmöglichkeiten ergeben sich nach SCHÄFER³⁾ unter dem

1) Damit werden Erörterungen über die optimale Betriebsgröße insoweit unwesentlich.

2) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 17

3) Vgl. Schäfer, E.: Betriebswirtschaftliche Marktforschung. Essen 1955, S. 76/77 in Verbindung mit Schäfer, E.: Absatzwirtschaft. HdW Bd. 1. Köln/Opladen 1958, S. 299 - 379, hier S. 349 - Vgl. dazu insbesondere Schäfer, E.: Der Industriebetrieb - Industriebetriebslehre auf typologischer Grundlage Bd. 1 Köln/Opladen 1969, S. 101 - 116, wo Schäfer unter dem Aspekt der technisch-ökonomischen Struktur des Industriebetriebs mit dem "Grad und der Richtung der Spezialisierung" global auf dieses Thema eingeht. Er unterscheidet drei Spezialisierungsrichtungen (S. 102):

(1) Spezialisierung oder Festlegung auf die Bearbeitung eines bestimmten Materials;

Gesichtspunkt des Materialprinzips, Verfahrensprinzips und Zweckprinzips, während HAX¹⁾ von produktions- und absatzverwandten Artikeln, und ZIMMERMANN²⁾ ähnlich wie SCHÄFER, aber mit terminologischer Anlehnung an KOSIOL, von Stoffergänzung, Transformationsergänzung und Absatzergänzung spricht. ABROMEIT³⁾ führt darüber hinaus auch noch finanzwirtschaftliche Gesichtspunkte an, etwa Verwertung überschüssigen Kapitals, Sicherung des angelegten Kapitals und Bereitschaft des Kapitals zur Neuformierung.

Die Erörterung der unter diesen Gesichtspunkten neu aufzunehmenden oder auszuscheidenden Produkte - also des qualitativen Problems der Programmplanung⁴⁾ - soll, da in bezug auf unser Thema am Rande liegend, unterlassen und auf die ausführliche Behandlung in der Literatur,⁵⁾ speziell bei ZIMMERMANN⁶⁾, verwiesen werden.

Wir wollen uns vielmehr der quantitativen Programmgestaltung zuwenden.

3) Fortsetzung von Seite 94:

- (2) Spezialisierung oder Festlegung auf die Ausübung bestimmter Fertigungsverfahren oder Prozesse;
- (3) Spezialisierung oder Festlegung auf Fertigungsleistung für einen bestimmten Bedarf.

Diese Ausführungen werden durch entsprechende Beispiele über das Fertigungsprogramm aus den verschiedenen Industriebetrieben ergänzt.

- 1) Vgl. Hax, H.: Die Gestaltung ..., a.a.O., S. 499
- 2) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 18 - 25
- 3) Vgl. Abromeit, G.: Erzeugnisplanung und Produktionsprogramm ..., a.a.O., S. 132
- 4) Vgl. Beste, Th.: Fertigungsprogramm. In: HWB. a.a.O., Sp. 1752
- 5) Siehe obige Angaben
- 6) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 18 - 25

b) Die quantitative Programmgestaltung

Als Ergebnis aus den Erörterungen über die verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten des Ergänzungsproblems ergibt sich die Frage, nach welchen Kriterien zu bewerten ist, um einem optimalen Programm möglichst nahezukommen. Die Fertigungsprogrammgestaltung soll zur Gewinnmaximierung führen.¹⁾ Damit ergibt sich das Problem der Programmgestaltung als Beziehung zwischen dem Gewinn als zu erklärendes Phänomen und der Gestalt des Fertigungsprogrammes als erklärendes Phänomen.²⁾ In diesen quantifizierten Beziehungen werden sich auch die oben nur kurz angedeuteten Gestaltungseinflüsse niederschlagen.³⁾

Unter der Annahme, die Fertigungskapazität voll auszunützen, ist beim Industriebetrieb die Frage der Programmstrukturierung nicht nach Art und Menge getrennt zu betrachten, denn die Anzahl der Produktarten ist nicht ohne gleichzeitige Änderung des Mengengerüstes - bei Beibehaltung obiger Annahme (Kapazität) - zu ändern.

Wie ist nun die Menge der einzelnen Produktarten zu be-

1) Vgl. Gutenberg, E.: Anmerkungen zur Frage der Gestaltung industrieller Produktionsprogramme. In: ZfB 1964 (34), S. 667 - 675, hier S. 667.

Zur Gewinnmaximierung als Maxime unternehmerischen Handelns vergleiche Koch, H.: Das Wirtschaftlichkeitsprinzip als betriebswirtschaftliche Maxime. In: ZfhF (NF) 1951 (3), S. 160 - 170, besonders S. 163 - 170; Forker, H.-J.: Das Wirtschaftlichkeitsprinzip und das Rentabilitätsprinzip und ihre Eignung zur Systembildung. Berlin 1960, S. 177 - 193; Pack, L.: Rationalprinzip und Gewinnmaximierungsprinzip. In: ZfB 1961 (31), S. 207 - 220, S. 283 - 290, hier S. 210 - 220 und S. 289 - 290

2) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 25

3) Hax hat das Problem der Programmoptimierung in zwei selbständige Teilprobleme der optimalen Auswahl und der optimalen Artikelzahl zerlegt. Vgl. Hax, H.: Die Gestaltung des Fertigungsprogramms ..., a.a.O., S. 498 - 517, hier S. 499

stimmen, damit der Gewinn sein Maximum erreicht? Geht man davon aus, daß sich das angestrebte Gewinnmaximum einstellt, wenn die Grenzkosten gleich dem Preis oder dem Grenzerlös sind, dann wäre es zunächst naheliegend, für jedes einzelne Produkt eine Grenzkosten- und Grenzerlöskurve aufzustellen und die Produkte jeweils mit der Menge in das Programm aufzunehmen, bei der sich ein Gleichgewicht zwischen Grenzerlös und Grenzkosten ergibt. Bei der Annahme von konstanten, d.h. mengeninvarianten Preisen, wie sie sich bei atomistischen Marktverhältnissen ergeben, genügt allein die Aufstellung der Grenzkostenkurve, deren Schnittpunkt mit der Preisgeraden dann das partielle Gewinnmaximum in bezug auf das betrachtete Produkt anzeigt.¹⁾

Es läßt sich jedoch zeigen, daß der Gesamtgewinn nicht auf dem Wege der Bestimmung solcher partieller Gewinnmaxima zu erreichen ist. Neben der grundsätzlichen Schwierigkeit der Grenzkostenermittlung muß auch auf die Änderung des Verlaufs der Grenzkosten durch die unterschiedliche Ergänzungseigenschaft der einzelnen Produkte hingewiesen werden. So ergeben sich unterschiedlich fallende Fertigungskosten bei Material- und Verfahrensergänzung und ein Sinken der Absatzkosten bei Zweckergänzung (Absatzergänzung).²⁾ Die Ausprägung dieser Ergänzungs-

1) Vgl. auch Hofmann, R.: Gewinnoptimale Unternehmungssteuerung bei gegebenem Produktions- und Absatzprogramm. Diss. St. Gallen 1962, S. 52 ff.

2) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 27/28 - Es ist offensichtlich, daß die Herstellung eines zusätzlichen Artikels aus gleichem Material wie die Produkte des schon bestehenden Fertigungsprogramms geringere Herstellkosten mit sich bringt als eine Programmergänzung mit Artikeln aus anderem Material. Ähnliche Überlegungen ergeben sich bei der Artikelergänzung unter Beibehaltung des gleichen Verfahrens. Zusätzliche Produkte für den gleichen Bedarf erfordern in der Regel geringere Absatzkosten, da die gleiche Absatzorganisation Verwendung finden kann.

eigenschaft der einzelnen Produkte und damit ihre Auswirkung auf den Grenzkostenverlauf kann nur in bezug auf das Gesamtprogramm festgestellt werden. Dieser interdependente Zusammenhang der Ergänzungseigenschaft schließt somit aus, daß die Grenzkostenkurven einzeln und nacheinander für das jeweilige Produkt ermittelt werden können. Außerdem beruhen die vergleichenden Überlegungen Grenzkosten zu Grenzerlös auf einer unbeschränkt vorhandenen Kapazität,¹⁾ die ja in Wirklichkeit gewöhnlich auch nicht gegeben ist. Wir haben vielmehr beschränkte Kapazitäten, die gewinnmaximal ausgenutzt werden sollen. Damit bedarf es zur realistischen Betrachtung der Einbeziehung der Kapazitätsbeanspruchung bei den einzelnen Fertigungsprodukten. Die Steuerung des gewinnmaximalen Programms vollzieht sich dann in der Form, daß das einzelne Produkt mit einem "bestimmten Erfolg" in bezug auf den knappen Faktor bewertet wird. In welcher Form der Erfolg definiert ist, spielt von der Gesamtkonzeption her keine entscheidende Rolle.^{2) 3)}

1) Vgl. Hofmann, R.: Gewinnoptimale ..., a.a.O., S. 52 - 54

2) Plaut arbeitet zur Steuerung von Leistungsengpässen mit Grenzkostengewinnen je Std., to, etc. ... vgl. Plaut, H.G.: Die Grenzkostenrechnung in der Diskussion und ihre weitere Entwicklung. In: ZfB 1958 (28), S. 251 - 266, hier S. 260
Nach Abromeit soll die Produktionskapazität bei Engpässen mit sogenannten, auf den knappen Faktor bezogenen, Gewinnstandards auf die einzelnen Produkte aufgeteilt werden. Vgl. Abromeit, G.: a.a.O., S. 214. Weitere Autoren, die den Erfolg bei der Engpaßbelegung einbeziehen, sind:
Rehm, Th.: Plankosten und Plannutzen. In: ZfB 1950 (20), S. 472 - 475;
Riebel, P.: Das Rechnen mit Einzelkosten und Deckungsbeiträgen. In: ZfhF (NF) 1959 (11), S. 213 - 238, besonders S. 232 ff.;
Weblus, B.: Produktionseigenarten der chemischen Industrie, ihr Einfluß auf Kalkulation und Programmgestaltung, Berlin 1958, S. 111 - 114 sowie
Schmalenbach, der bei seinem, der Engpaßaufteilung gleichzusetzenden, Problem der gehemmten Beschaffung ebenfalls eine Bewertung mit Erfolgsziffern verlangt.

Fortsetzung siehe Seite 99

3) Fußnote siehe Seite 99

Aber auch diese Art der Programmermittlung wird schwierig, wenn mehrere Engpässe im Laufe der Produkterstellung bei einer Vielzahl von Erzeugnissen mit unterschiedlichen Produktionskoeffizienten auftreten, da dann die gewinnmaximale Zusammensetzung des Programmes nicht mehr zu übersehen ist.

Das optimale Fertigungsprogramm kann also nicht dadurch ermittelt werden, daß man die gewinngünstigste Menge der einzelnen Produkte errechnet; es müssen vielmehr verschiedene Fertigungsprogramme miteinander verglichen werden, bei denen die einzelnen Produktarten mit unterschiedlicher Menge vertreten sind, die die verfügbare Kapazität in den einzelnen Bearbeitungsstufen aber nicht überschreiten dürfen. Eine allgemeingültige Methode zur Durchführung dieser Konzeption liefert uns das Linear Programming.

3. Die "lineare Programmplanung"

Aufbauend auf die in Teil 1 Kap. A/III/2/a gemachten Erläuterungen wollen wir von dem dort angeführten Standard-Produktionsmodell¹⁾ ausgehen, um über die folgende allgemein-produktionstheoretische Interpretation der ein-

2) Fortsetzung von Seite 98:

Vgl. Schmalenbach, E.: Grundlagen der Selbstkostenrechnung und Preispolitik. 4. Aufl. Leipzig 1927, S. 15

3) Fußnote von Seite 98:

Vgl. dazu auch die Bestimmung der gewinnmaximalen Produktart nach der traditionellen Beiträgs kalkulation bei Frenckner, T.P.: Bestimmung des Produktionsprogrammes als Anwendungsbeispiel der Linearplanung. In: ZfhF (NF) 1958 (10), S. 565 - 594, hier S. 567/68

- 1) Wird das allgemeine Produktionsmodell (Standard-Modell) zur Bestimmung des industriellen Fertigungsprogrammes verwendet, wollen wir von linearer Programmplanung sprechen.

zelnen Elemente dieses Produktionsmodells die erklärende Grundlage für unser praktisches Beispiel zu schaffen.¹⁾

Das damals angeführte Produktionsmodell hat gelaute:²⁾

$$(5) \quad C = c^T x = \max$$

$$(6) \quad Ax \leq b$$

$$(7) \quad x \geq 0$$

Es wird nun allgemein zu zeigen sein, daß sich die technischen und ökonomischen Produktionsbedingungen eines Betriebes hinreichend genau durch die dem Ansatz des Produktionsmodells zugrundeliegenden mathematischen Beziehungen abbilden lassen.

a) Interpretation der Matrix A

Ziel jeder betrieblichen Produktion ist die Erzeugung von Gütern durch Umwandlung oder Umformung bestimmter

- 1) Durchgerechnete Beispiele finden sich bei Frenckner, T.P.: Bestimmung des Produktionsprogrammes, a.a.O.; Hürliman, W.: Lineare Programmierung - Eine Einführung für Nicht-Mathematiker. Zürich - Düsseldorf 1963, S. 5 - 23; Mathieu, J. und Zimmermann, W.: Bestimmung des optimalen Produktionsprogrammes in Industriebetrieben (Rationalisierung der Programmplanung). Köln - Opladen 1962, Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 1111; Dischner, K.-H.: Die Bestimmung der wirtschaftlichen Produktions- und Absatzmenge bei industrieller Sortenfertigung unter Anwendung der Linearen Programmierung. Diss. Mannheim 1960, S. 50 - 104 und in den meisten allgemeinen Lehrbüchern. Vgl. auch die angegebene Literatur in Teil 2/C.
- 2) Im vorausgegangenen Teil (Teil 1/A/III/2/a) ist das Standardmodell des Linear Programming im allgemeinen Produktionsmodell ökonomisch interpretiert worden; hier erfolgt nun die produktionstheoretische Auslegung und im praktischen Teil werden die betriebswirtschaftlichen Voraussetzungen näher untersucht. Diese Trennung hat sich von der Gesamtkonzeption her als sinnvoll erwiesen, obwohl dadurch einzelne Wiederholungen nicht zu vermeiden sind.

Objekte, also Gegenstände im allgemeinsten Sinne aus einem gegebenen Anfangszustand in einen bestimmten Endzustand zu überführen. Diese Umwandlung kann auf die verschiedenste Weise (Produktionsverfahren) stattfinden und wird als "Prozeß"¹⁾ oder in Anlehnung an die anglo-amerikanische Terminologie als "Aktivität"²⁾ bezeichnet. Ein Prozeß stellt sich also beim Linear Programming als eine "produktionswirtschaftliche Grundeinheit dar, die eine festliegende quantitative und qualitative Verknüpfung zwischen dem Einsatz von Produktionsfaktoren und den bei diesem Einsatz entstehenden Produktmengen zum Ausdruck bringt. Der Prozeß kann aus einer einzigen technologischen Produktionsstufe, respektive einem einzigen verfahrensmäßigen Bearbeitungsgang, bestehen, er mag aber auch eine Gruppe aufeinanderfolgender Elemente dieser Art enthalten."^{3) 4)}

Mathematisch läßt sich ein "Prozeß" als ein Spaltenvek-

-
- 1) Vgl. dazu den allgemeinen Prozeßbegriff von Kloidt, H.: Betriebsprozeß. In: HWB, 3. Aufl. Bd. 1. Stuttgart 1956, Sp. 824 - 828, hier Sp. 825: "Der Prozeß ist ein zusammenhängender, in Raum und Zeit gesetzmäßig ablaufender und fortschreitender Vorgang. Er ist Bewegung und Veränderung zugleich." - "Der Begriff des Prozesses ist in der Betriebswirtschaftslehre schon immer geläufig. Denn bei allen Kalkulationsverfahren ist es notwendig, den Produktionsablauf bis ins Detail zu verfolgen. Das Kalkulationsschema stellt eine Abbildung der technologischen Transformationen dar." Förstner, K.: Betriebs- und volkswirtschaftliche Produktionsfunktionen. In: ZfB 1962 (32), S. 264 - 282, hier S. 278
 - 2) Vgl. Dantzig, G.B.: a.a.O., S. 7
 - 3) Wittmann, W.: Lineare Programmierung und traditionelle Produktionstheorie. In: ZfhF (NF) 1960 (12), S. 1 - 17, hier S. 3 und Fußnote 5
 - 4) Vgl. dazu auch den Prozeßbegriff von v. Falkenhausen, H.: Optimallösungen für Entscheidungsfolgen. Ermittlung durch analytische Methoden (dynamic programming) und Simulation. IBM-Fachbibliothek Form 78105-11.63, S. 3 bei der "Dynamischen Optimierung": "Die Vorgänge im System bezeichnet man allgemein als Prozeß."

tor deuten, so daß dann die gesamten "Produktionsverfahren"¹⁾ des Betriebes durch die entsprechenden Prozeßvektoren dargestellt und in einer sogenannten Prozeßmatrix zusammengefaßt werden können.²⁾

b) Die Interpretation der Vektoren b , c^T und x ³⁾

Der Spaltenvektor der Begrenzungskonstanten $b_1 - b_m$

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_m \end{pmatrix}$$

- 1) Werden zur Erzeugung einer Einheit des Produktes k von diesen Einsatzgütermengen - zur Verfügung stehende Kapazität - b_j ($b_1 - b_m$) die (in ihrem Verhältnis konstanten) Mengen a_{1k} , a_{2k} ... a_{mk} benötigt, so kann dieser k -te Prozeß als Spaltenvektor

$$a_k = \begin{pmatrix} a_{1k} \\ a_{2k} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{mk} \end{pmatrix}$$

verschiedene "Verfahren im üblichen Sinn" umfassen. Die Menge a_{1k} stellt den Zeitbedarf für eine Produkt-einheit k beim Ziehen des Glases dar, die Menge a_{2k} die Zeit beim Schneiden, die Menge a_{3k} beim Verpacken usw. (Vgl. dazu auch unsere Ausführungen in Teil 2/C). Kann der Betrieb insgesamt r Produkte herstellen, so umfaßt die Prozeßmatrix r Spaltenvektoren (Prozeßvektoren).

- 2) Vgl. Wetzel, W.: Theoretische Grundlagen des linearen Programmierens, der Einsatz-Ausstoß-Analyse und der Spieltheorie. In: Anwendungen der Matrizenrechnung auf wirtschaftliche und statistische Probleme. Hrsg.: Adam, A. und andere ... 2. durchges. und erw. Aufl. Würzburg 1963, S. 129 - 184, hier S. 149 - 154 und Steinmann, H.: Lineare Produktionsmodelle der kurzfristigen Programmplanung - Zur statischen Produktionstheorie auf der Grundlage der Linearen Planungsrechnung. Nat.wiss. Diss. Clausthal 1962, S. 40 - 46

- 3) Vgl. Steinmann, H.: a.a.O., S. 40 - 49

enthält soviele Elemente wie die Matrix Zeilen hat und gibt die absolute Grenze des Produktionsmodells wieder. Dabei können die einzelnen Elemente des Vektors b als Produktionsgrenzen (Kapazitätsgrenzen), wie sie sich aus der beschränkten Verfügbarkeit von Produktionsfaktoren, der Absatzsituation sowie durch finanzielle Restriktionen ergeben, interpretiert werden.¹⁾ Der Vektor b wird in der Produktionstheorie auf der Grundlage von Linear Programming als der Vektor der "produktiven Faktoren", nämlich derjenigen Faktoren, "welche auf die Produktionsplanung einen gestaltenden Einfluß ausüben können"²⁾, bezeichnet. Alle Produktionsfaktoren, für die $b_1 = \infty$ ist, d.h. die unbeschränkt zur Verfügung stehen, werden in diesem Sinne nicht als produktive Faktoren bezeichnet.

Der Zeilenvektor c^T ist der Vektor der Zielfunktionskoeffizienten. Er erhält die den Produktionsprozessen zugeordneten Wertgrößen, die je nach der Problemstellung als Kosten, Stückerlöse, Deckungsbeiträge etc. zu deuten sind.

Der Vektor x bezeichnet ganz allgemein die Vielfachheit oder das (Prozeß-)Niveau (Prozeßgrad) der einzelnen Prozesse. Damit stellt sich zwangsläufig die Frage nach dem Einheitsmaß, auf das alle Elemente des Vektors bezogen werden. Dieses Maß kann entweder ein Geld- oder ein Sachmaß sein.³⁾ Was man wählt, hängt weitgehend vom Charakter der Prozesse ab. Es gibt dafür keine generell gültige Regel; es ist vielmehr immer das für die je-

1) Neben technischen Beschränkungen lassen sich auch wirtschaftliche Beschränkungen erfassen.

2) Albach, H.: Lineare Programmierung als Hilfsmittel betrieblicher Investitionsplanung. In: ZfhF 1960 (12), S. 526 - 559, hier S. 530

3) Als Sachmaß kommen Maschinenstunden, Arbeitsstunden, Stückmengen etc. in Frage; ein Geldmaß empfiehlt sich beim Auftreten von Zwischenprodukten. Vgl. im einzelnen Steinmann, H.: a.a.O., S. 48

weilige Prozeßgestaltung günstigste Einheitsmaß zu wählen.

So beschreibt der Ausdruck

$$a_k x_k = \begin{pmatrix} a_{1k} x_k \\ a_{2k} x_k \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_{mk} x_k \end{pmatrix}$$

die Art und das Ausmaß des Prozesses, wobei der Faktorbedarf (Einsatzgütermengenbedarf¹⁾) des k-ten Prozesses auf dem Niveau x_k gemeint ist. Ein Fertigungsprogramm P ist dann einfach die Summe der Vektoren aller Prozesse - jeder auf dem Niveau, auf dem er im Programm realisiert wird. Dabei wird das Fertigungsprogramm P vollständig durch den die Prozeßniveaus angegebenden Programmvektor $x = (x_1, x_2 \dots x_n)$ beschrieben, wobei dieser Programmvektor x den Beschränkungen b genügen muß. Es gilt:

$$Ax \leq b$$

Da wir in der Regel mehr Produktarten n als Verfahren (Einsatzgüterarten) m haben, d.h. Abteilungen, die die einzelnen Produktarten durchlaufen - $m \leq n$ -, gibt es eine Vielzahl von Programmvektoren x_i , die das Ungleichungssystem erfüllen. Erst in Verbindung mit dem Vektor der Zielfunktionskoeffizienten c^T ist ein Kriterium gegeben, das eine ganz bestimmte optimale Kombination der Programmvektoren x_i ermöglicht. Die Bedingung $x \geq 0$ schließt dabei ökonomisch unmögliche, negative Prozesse aus. Grundsätzlich wäre es jedoch denkbar, daß die Nichtnegativitätsbedingung für einige Produkte ausgeklammert bleibt, wenn man diese als vom Lieferanten bezogene Mengen x des Produktes k auffaßt.²⁾

1) Vgl. die besondere Terminologie bei Zimmermann, W.: a.a.O., S. 31 - 34

2) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 34/35

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß die formalen Bestandteile des allgemeinen Produktionsmodells produktionstheoretisch interpretierbar sind und damit eine Abbildung der betrieblichen Produktionsverhältnisse möglich ist. Damit läßt sich das Linear Programming-Modell zur Fertigungsprogrammplanung heranziehen. Allerdings müssen hierzu weitere ökonomische Voraussetzungen¹⁾ erfüllt sein, auf die im einzelnen hier nicht eingegangen werden soll. Es handelt sich im wesentlichen um die Voraussetzungen

- der Additivität der "Prozesse"²⁾
- der Nichtnegativitätsbedingung³⁾
- der Linearität von Kosten und Erträgen⁴⁾
- der Konstanz der Koeffizienten.⁴⁾

4. Langfristige Programmplanung und wirtschaftliche Losgröße

Neben dieser mehr kurzfristigen Bestimmung des Fertigungsprogramms nach Art und Menge ist auch der langfristigeren Programmplanung in verschiedenen Ansätzen besondere Aufmerksamkeit gewidmet worden. Das optimale Fertigungsprogramm muß dabei der wechselnden Nachfrage entsprechen, Beschränkungen in den Produktionskapazitä-

1) Vgl. im einzelnen bei Steinmann, H.: a.a.O., S.50-62; Dantzig, G.B.: a.a.O., S. 38 - 40; Bohmer, R.: a.a.O., S. 131 - 165

2) Die Additivitätseigenschaft der Prozesse bedeutet ökonomisch, daß identische Produkt- und Faktorenmengen zweier nicht identischer Prozesse addiert werden können. Dabei wird eine ökonomische Unabhängigkeit der Prozesse in dem Sinne unterstellt, daß keine ertrags- bzw. kostenerhöhenden oder -senkenden Effekte - gleichgültig welche Prozesse auch immer kombiniert werden - eintreten. Vgl. dazu Steinmann, H.: a.a.O., S. 57/58

3) Vgl. dazu unsere Ausführungen in Teil 1/A/III/2/a/bb

4) Diese Voraussetzungen bzw. weitere ökonomisch interessante Probleme werden in Teil 2/C/I/1 - 5 untersucht.

ten berücksichtigen und eine Gesamtkostenfunktion, die sich aus Produktionskosten, Lagerhaltungskosten und Kosten aus der Änderung der Beschäftigung (z.B. Personalangleichung) aufbaut, minimieren. Dieses Problem, im besonderen als "production smoothing problem" bekannt, ist schon einmal bei der Lagerhaltungstheorie angesprochen worden. Dort ist es besonders unter dem Gesichtspunkt der Lagerhaltung behandelt worden.¹⁾

Bei dieser Art der Programmplanung handelt es sich im wesentlichen um die Produktion nur eines Erzeugnisses, das in einem dynamischen Modell, d.h. mehrere Fertigungsperioden umfassend, mit deterministischem und diskretem Bedarf, optimal verplant werden soll. Die verschiedenen Modelle unterscheiden sich in erster Linie dadurch, ob die Umstellungskosten der Produktion²⁾ berücksichtigt werden oder nicht. Die grundlegenden Überlegungen hierzu sind schon 1938 von SCHNEIDER³⁾ veröffentlicht worden, der als Vorläufer aller sich mit diesem Problem auseinandersetzenden Autoren gelten kann. Dies gilt auch für die spätere Behandlung mit Operations Research.⁴⁾

1) Vgl. Teil 1/III/5

2) Gemeint sind hier die Kosten, die durch den Wechsel im Beschäftigungsgrad entstehen.

3) Vgl. Schneider, E. - Jessen, B.: Absatz, Produktion und Lagerhaltung bei einfacher Produktion. In: Archiv für Mathematische Wirtschafts- und Sozialforschung. Bd. IV (1938), S. 99 - 120

4) Die meisten Modelle sind zur Lösung mit der "Linearen oder Dynamischen Optimierung" konstruiert; aber auch die Warteschlangentheorie und die Netzwerkanalyse werden verwendet. Vgl. Graver, jr., D.P.: Operating Characteristics of a Simple Production, Inventory-Control Model. In: JORSA 1961 (9), S. 635 - 649 zur Verwendung der Warteschlangentheorie und Hu, T.C. - Prager, W.: Network Analysis of Production Smoothing. In: Nav.Res.Log. Quarterly 1959 (6), S. 17 - 24 mit der Netzwerkanalyse.

Den Ausgangspunkt für die operationsanalytische Anwendung ohne Berücksichtigung der Produktionswechselkosten bilden die Modelle von MODIGLIANI - HOHN¹⁾ und DANØ - JENSEN.²⁾ BOWMAN³⁾ formuliert ein Modell, das mit der "Transportmethode" gelöst werden kann.⁴⁾ 5)

HOLT - MODIGLIANI - MUTH und SIMON⁶⁾ berücksichtigen in ihrem Ansatz die Produktionswechselkosten, die durch die Angleichung des Personalstandes an die jeweilige Beschäftigungslage entstehen. Eine gewisse Ähnlichkeit dazu zeigt das Modell von HANSSMANN,⁷⁾ der jedoch li-

-
- 1) Vgl. Modigliani, F. - Hohn, F.E.: Production Planning Over Time and the Nature of the Expectation and Planning Horizon. In: Econometrica 1955 (23), S. 46 - 66
 - 2) Vgl. Danø, S. - Jensen, E.L.: Production and Inventory Planning in a Fluctuating Market. In: Metrika 1958 (1), S. 28 - 40; sie lösen das Modell mit Hilfe des Linear Programming.
 - 3) Vgl. Bowman, E.H.: Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming. In: JORSA 1956 (4), S. 100 - 103
 - 4) Bowmans Ausführungen werden von Bishop, G.T.: On a Problem of Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming. In: JORSA 1957 (5), S. 97 - 103 und Wetzell, W.: Comments on "Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming". In: JORSA 1957 (5), S. 440 - 442 ergänzt.
 - 5) Vgl. dazu weiter Manne, A.S.: A Note on the Modigliani - Hohn Production Smoothing Model. In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 371 - 379; Johnson, S.M.: Sequential Production Planning Over Time at Minimum Cost. In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 435 - 437; Egert, Ph.: Probleme des Produktionsausgleichs. In: Ufo 1961 (5), S. 216 - 226
 - 6) Holt, Ch.C. - Modigliani, F. - Muth, J.F. - Simon, H.A.: Planning Production, Inventories and Work Force. Englewood Cliffs, N.J. 1960; sie arbeiten mit quadratischen Kostenfunktionen unter Verwendung der Differentialrechnung (S. 47 - 121).
 - 7) Vgl. Hanssmann, F.: Operations Research and Inventory Control. New York - London 1962, S. 115 - 118; Schild, A.: On Inventory, Production and Employment Scheduling. In: Mgmt. Sci. 1959 (5), S. 157 - 168 hat diese Ergebnisse verbessert.

neare Kostenfunktionen voraussetzt und die Lösung mit Hilfe des Linear Programming erhält. ARROW, KARLIN, SCARF¹⁾ verwenden ein kontinuierliches Modell, während BECKMANN²⁾ ein stochastisches Modell entwickelt, das er mit der Dynamischen Optimierung löst.³⁾

Im Rahmen des Fertigungsprogramms ist von Operations Research auch das Gebiet der schon seit langem bekannten⁴⁾ und umstrittenen⁵⁾ wirtschaftlichen Losgrößenbestimmung wieder stärker in den Vordergrund gerückt worden.⁶⁾ Ein Zusammenhang zur Strukturierung des Fertigungsprogramms ergibt sich insofern, als es erst der Festlegung der

-
- 1) Arrow, K.J. - Karlin, S. - Scarf, H.: Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production. Stanford 1958, S. 70 - 85
 - 2) Vgl. Beckmann, M.J.: Production Smoothing and Inventory Control. In: JORSA 1961 (9), S. 456 - 467
 - 3) Weitere Autoren: Klein, M.: On Production Smoothing. In: Mgmt. Sci. 1961 (1), S. 286 - 293 kombiniert die Modelle von Modigliani - Hohn und Hoffman - Jacobs. Vgl. Hoffman, A.J. - Jacobs, W.: Smooth Patterns of Production. In: Mgmt. Sci. 1954 (1), S. 86 - 91. Karush - Vazsonyi, A.: Mathematical Programming and Service Scheduling. In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 140 - 148 lassen in ihren Ausführungen die Lagerhaltungskosten unberücksichtigt.
 - 4) Vgl. dazu Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung ..., a.a.O., S. 27 - 59, der über Entwicklung der Losgrößenformel einen umfassenden Überblick verschafft.
 - 5) Zur Kritik vergleiche Schäfer, E.: Losgröße und Kostengestaltung. In: ZfB 1931 (8), S. 823 - 832, besonders S. 828; Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung ..., a.a.O., S. 60 - 62; Orth, L.: Die Eignung der Losgrößenformel als Instrument der Produktionsplanung. In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 738 - 749, hier S. 741 - 744
 - 6) Entwicklungen der alten Formel bzw. neuere Ansätze finden sich bei Schlüter, H.: Untersuchungen zum Problem der optimalen Losgröße. Diss. Frankfurt/M. 1958; Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung ..., a.a.O., S. 66 - 199; Peters, B.: Die Bestimmung der optimalen Losgröße.

Fortsetzung siehe Seite 109

Fertigungsmenge je Produkt und Periode¹⁾ bedarf, ehe man daran gehen kann, die Auftragsmengen in wirtschaftliche Losgrößen aufzuteilen. Allerdings läßt sich das Problem der Losgrößenbestimmung, besonders bei der Mehrproduktunternehmung nicht ohne Bezug auf die Lossequenzplanung und damit auf die Fertigungsablaufplanung betrachten, so daß wir hier den verbindenden Übergang zur Ablaufplanung vollziehen können.^{2) 3)}

III. Fertigungsablaufplanung

Haben wir uns bisher mit den mehr statischen⁴⁾ Fragen der kurz- und langfristigen Fertigungsprogrammplanung befaßt, so wollen wir im folgenden die Frage des zeitlichen Vollzugs der Produktion unter Verwendung operationsanalytischer Verfahren näher untersuchen.

6) Fortsetzung von Seite 108:

Eine Anwendung der Nichtlinearen Programmierung.
Diss. Göttingen 1961;

Müller-Merbach, H.: Sensibilitätsanalyse der Losgrößenbestimmung. In: Ufo 1962 (6), S. 79 - 88;

Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen bei mehrstufiger Fertigung. Sonderdruck aus: ZWF 1965 (60), Heft 3, S. 113 - 118.

Beachte auch die in obigen Veröffentlichungen angegebene Literatur.

- 1) Im allgemeinen handelt es sich um langfristigere Überlegungen.
- 2) Vgl. dazu unsere folgenden Ausführungen.
- 3) Eine Kombination von optimaler Programmplanung und Losgrößenbestimmung findet sich bei Salveson, M.E.: A Problem in Optimal Machine Loading. In: Mgmt. Sci. 1956 (2), S. 232 - 260.
- 4) Beziehen sich alle Werte (Einflußgrößen) auf die gleiche Zeitperiode, so spricht man von statischer Betrachtung. Von der Modellbetrachtung her lassen sich die Werte der einzelnen Teilperioden auch dynamisch interpretieren. Vgl. Schneider, E.: Einführung in die Wirtschaftstheorie, Bd. 2, 9. Aufl., Tübingen 1964, S. 264

1. Abgrenzung

Beim Entwurf einer zeitlichen Ordnung der Fertigung können wir zwei Teilfragen unterscheiden:¹⁾ Einmal die Betrachtung des zeitlichen Fortschritts der Fertigungsaufträge von Bearbeitungsgang zu Bearbeitungsgang. Die hier auftretenden Probleme wollen wir als allgemeine (zeitliche) Fertigungsablaufplanung in einem späteren Kapitel behandeln. Ein zweites Zeitplanungsproblem betrifft die im letzten Kapitel schon behandelte Abstimmung von Produktionsend- und Absatzterminen unter Bildung eines Lagers. Bei dieser zeitlichen Emanzipation der Produktion vom Absatz handelt es sich von der Gesamtkonzeption her um eine statische²⁾ Programmplanung,³⁾ denn es wird die Verkaufszahl der Periode⁴⁾ auf einzelne Teilperioden mengenmäßig so verteilt, daß

- (1) die Befriedigung der Nachfrage gesichert ist und
- (2) die Summe aus Herstell- und Lagerkosten ein Minimum ergibt.⁵⁾

Läßt sich dieses Problem beim Einproduktunternehmen trotz des eingeführten Zeitfaktors noch als Programmpla-

-
- 1) Vgl. Adam, D.: Produktionsplanung bei Sortenfertigung. Ein Beitrag zur Theorie der Mehrproduktunternehmung. Diss. Hamburg 1965, S. 12; Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., Bd. 1, 12. Aufl., S. 197 - 199; Beste, Th.: Die Produktionsplanung. In: ZfhF 1938 (32), S. 345 - 371, hier S. 350 - 354
 - 2) Beziehen sich alle Werte (Einflußgrößen) auf die gleiche Zeitperiode, so spricht man von statischer Betrachtung. Von der Modellbetrachtung her lassen sich die Werte der einzelnen Teilperioden auch dynamisch interpretieren. Vgl. Schneider, E.: Einführung in die Wirtschaftstheorie, Bd. 9, 9. Aufl., Tübingen 1964, S. 264
 - 3) Ellinger sieht, wie wir, herein ein Problem der Programmplanung. Vgl. Ellinger, Th.: Ablaufplanung ..., a.a.O., S. 16
 - 4) Hierbei handelt es sich um Monoproduktion.
 - 5) Vgl. Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung ..., a.a.O., S. 14

nungsproblem betrachten, so ändert sich dies beim Übergang auf die Mehrproduktunternehmung. Augenscheinlichstes Beispiel hierfür ist die sogenannte Losdimensionierung¹⁾ bei Serien- und Sortenproduktion.²⁾

Das Losgrößenproblem mit seiner Bestimmung der optimalen Menge kann man noch ohne weiteres als Unterproblem der mengenmäßigen Programmbestimmung betrachten.³⁾ Allerdings beachtet diese Losgrößenbestimmung nicht die Konkurrenz der Sorten und Serien um die Fertigungstermine und Belegzeiten der gemeinsam genutzten Betriebsmittel. Gerade diese Lossequenzplanung⁴⁾ ist aber eine der

-
- 1) Unter Losdimensionierung fassen wir das Losgrößen- und Lossequenz- und u.U. das Losfolgeproblem zusammen.
 - 2) Typisch für die Sortenfertigung ist, daß mehrere produktions- und häufig auch absatzverwandte Erzeugnisse (spezielle Ausführungsformen eines Grunderzeugnisses) in größeren Mengen als geschlossener Posten zeitlich nacheinander auf derselben Produktionsanlage hergestellt werden. Vgl. Siepert, H.M.: Der Einfluß der Losgröße auf die Produktionsplanung in Walzwerken. Diss. Köln 1958, S. 39
 - 3) Der Sonderfall der Losgrößenbestimmung bei mehrstufiger Fertigung einer Monoproduktunternehmung ergibt mit seiner Lösung auch schon die zur Ablaufplanung zählende Bestimmung der Zwischenlager. Eine Trennung in Struktur und Ablauf ist hier und in vielen anderen Fällen einfach nicht möglich. Vgl. Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen bei mehrstufiger ..., a.a.O.
 - 4) Die Lossequenzplanung hat in der Literatur bisher nur wenig Eingang gefunden. Hinweise finden sich bei Orth, L.: Die Eignung der Losgrößenformel als Instrument der Produktionsplanung. In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 738 - 749, hier S. 742
und in der Dissertation von Kilian, R.: Die Bestimmung wirtschaftlicher Erzeugnislosgrößen und -rhythmen sowie ihre optimale Verteilung über den Planzeitraum. Dresden 1962, S. 22 - 36, S. 127 - 145
Rogers, J.A.: A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem. In: Mgmt. Sci. 1958 (4), S. 264 - 291.
Auf die ausführlichen Erörterungen bei Adam, D.: Produktionsplanung ..., a.a.O., S. 121 - 153 sei verwiesen.

schwierigsten Aufgaben der Losdimensionierung. Es genügt also nicht die Berechnung der optimalen Losgröße, sondern die Losdimensionierung muß auch zu einem zeitlich durchführbaren Losprogramm führen (Lossequenzproblem). Hierbei handelt es sich offensichtlich um ein Ablaufproblem, das allerdings nur in Verbindung mit einer simultanen Los- und Programmplanung mit zeitlicher Koordination des "Los-auf-Lager-Rhythmus" zu lösen ist. ADAM hat für dieses Problem einen Modellansatz¹⁾ entwickelt und ein Beispiel²⁾ berechnet, das auch Lager- und Produktionskapazitätsbeschränkungen berücksichtigt.³⁾

In diesem Zusammenhang ist auch das zur Ablaufplanung zählende sogenannte Losfolgeproblem interessant. Allerdings tritt es auch wieder in Verbindung und Interdependenz mit dem Losgrößenproblem auf, so daß seine Einordnung schwierig ist, wie überhaupt eine Trennung zwischen Struktur (Programm) und Ablauf oft nicht möglich ist. Das Losfolgeproblem⁴⁾ beruht auf der Beobachtung unterschiedlich hoher, sowohl von der Losfolge als auch von der Losgröße abhängiger, Umbaukosten. Ziel der optimalen Losfolge ist die Minimierung der anfallenden Umbauko-

1) Vgl. Adam, D.: Produktionsplanung ..., a.a.O., S. 121 - 145.

Vgl. auch ders.: Simultane Ablauf- und Programmplanung bei Sortenfertigung mit ganzzahliger linearer Programmierung. In: ZfB 1963 (33), S. 233 - 245

2) Vgl. Adam, D.: Produktionsplanung ..., a.a.O., S. 145 - 153

3) Die von Adam gemachten Überlegungen könnten auch auf die Serienproduktion ausgedehnt werden.

4) Vgl. Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung ..., a.a.O., S. 17. Eng verbunden damit ist das Problem des Sortenwechsels, das besonders von Dinkelbach, allerdings mehr in Verbindung mit dem von uns so bezeichneten Lossequenzproblem und der Kapazitätsausnutzung, untersucht worden ist. Vgl. Dinkelbach, W.: Zum Problem der Losgröße und des Sortenwechsels bei der Produktionsplanung. Diss. Köln 1963 und ders.: Zum Problem der Produktionsplanung in Ein- und Mehrproduktunternehmen. Würzburg - Wien 1964

sten.¹⁾ Dieses Kostenminimierungsproblem ist aber aufgrund der bestehenden Interdependenzen komplizierter als jedes der beiden Einzelprobleme. So ergeben sich einerseits durch die Fixierung der Losfolge die für die Losgrößenbestimmung erforderlichen Umrüstkosten, andererseits ist die Losfolge von der Bestimmung der Losgröße abhängig, weil erst diese in Verbindung mit dem Periodenbedarf Aufschluß über die Auflegehäufigkeit der Lose gibt, ohne deren Festlegung wiederum die Losfolge nicht möglich ist.²⁾

Da die Losdimensionierung bei Mehrproduktunternehmen planungsmäßig nicht eindeutig zuzuordnen ist (Programm- oder Ablaufplanung), haben wir sie innerhalb eines eigenen Abschnittes behandelt. Wir bleiben uns dabei aber bewußt, daß auch innerhalb der Programm- und Ablaufplanung Interdependenzen vorhanden sind, die einer Aufteilung insgesamt entgegenstehen.

2. Wesen und Aufgabe der Fertigungsablaufplanung

Allgemein läßt sich unter Ablaufplanung "das Entwerfen einer Ordnung für den zukünftigen Vollzug von wirtschaftlichen Handlungen unter Verwendung bestimmter örtlich gebundener Sachmittel in bestimmter zeitlicher Reihenfolge verstehen, wobei dieses zeitlich geplante wirtschaftliche Geschehen a priori gesetzte Handlungsmaximen weitgehend erfüllen soll."³⁾ Eine solche Ablaufpla-

1) Einleuchtend läßt sich dies am Beispiel der Papierfabrik darstellen, wo der Wechsel von der Herstellung höherwertigem auf geringerwertiges Papier mit niedrigeren Sortenwechselkosten verbunden ist als der Wechsel in umgekehrter Reihenfolge. Ähnliches gilt für die Glasfabrik beim Wechsel von dünnem zu dickem Glas - allerdings nur von geringer absoluter Bedeutung.

2) Das Losfolgeproblem ist nur bei von vornherein fixierter Losgröße für sich allein existent.

3) Hoss, K.: a.a.O., S. 2

nung ist für jedes zeitablaufbedingte interdependente wirtschaftliche Geschehen möglich; wir beschränken uns hier auf die Fertigungsablaufplanung, die wohl zu den kompliziertesten und schwierigsten Gebieten der Fertigungsplanung gehört.

Mit der Fertigungsablaufplanung bestimmen wir das "wie", "wo", "wann" und "wer" der Produktion¹⁾ oder anders ausgedrückt: Bei Bewertung verschiedener alternativer Möglichkeiten ist unter bestimmten Zielsetzungen zu entscheiden,

- (1) welcher Auftrag oder Teilauftrag
 - (2) nach welchem Verfahren
 - (3) mit welchen Maschinen(-gruppen)
 - (4) zu welchem Zeitpunkt
 - (5) von welchen Arbeitskräften
- zu bearbeiten ist.²⁾

Von den Planungsaufgaben her handelt es sich um die Verfahrensauswahl, die Termingrobplanung, Durchlaufzeitbestimmung, Auftragsfolgenbestimmung, Zwischenlagerplanung, Terminfeinplanung und Maschinenbesetzungsplanung.³⁾

Bevor wir uns nun der Skizzierung der einzelnen Probleme der Fertigungsablaufplanung unter besonderer Berücksichtigung der Anwendung von Operations Research zuwenden, wollen wir die Auswirkungen der verschiedenen Fertigungssysteme auf eine operationsanalytische Fertigungsablaufplanung einer näheren Betrachtung unterziehen.

1) Vgl. Mellerowicz, K.: Kosten und Kostenrechnung. Teil Verfahren. Bd. II/2, 3. Aufl., Berlin 1958, S. 481

2) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 3

3) Vgl. die Ausführungen in Teil 1/B/I/2

3. Die operationsanalytische Fertigungsablaufplanung bei den verschiedenen Fertigungssystemen

Die in der Praxis auftretenden Produktionsformen sind der Verwendung operationsanalytischer Verfahren verschieden gut zugänglich. Zur typologisierenden Betrachtung dieser operationsanalytischen Ansätze bietet sich neben verschiedenen anderen Möglichkeiten¹⁾ die Aufteilung nach Fertigungssystemen²⁾ in Verbindung mit dem Grad der Verwirklichung des Massenprinzips an.

- 1) Das Merkmal der Verwirklichung des Massenprinzips allein scheint als typisierendes Unterscheidungsmerkmal der Fertigungsablaufplanung, in die vor allem auch die Fertigungsstruktur rechnerisch Eingang findet, nicht geeignet zu sein, wenn auch Hartmann im Hinblick auf die Fertigungsplanung mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung auf dieses Merkmal zurückgreift. Vgl. Hartmann, B.: Betriebswirtschaftliche Grundlagen der automatisierten Datenverarbeitung. Freiburg i.Br. 1961, S. 119; vgl. ebenso Nowak, P.: Bestimmung der Betriebsindividualität mit Hilfe von Betriebsgliederungen. In: ZfhF (NF) 1954 (6), S. 484 - 499, hier S. 494/495. Weitere Einteilungskriterien bieten sich mit der von Hanssmann in seinem Produktions-Lagerhaltungssystem angewandten Unterteilung in einstufige parallelschaltete und mehrstufige Systeme an. Vgl. Hanssmann, F.: Operations Research in Production and Inventory Control. New York - London 1962, S. 7. Ellinger verwendet die auch in der amerikanischen Literatur angewandten Unterscheidungen einer intermittierend und kontinuierlichen Fertigung zur weiteren Aufteilung seiner "Fertigungsverfahren": Einzel- und Massenfertigung. Vgl. Ellinger, Th.: Ablaufplanung ..., a.a.O., S. 77 - 86.
- 2) Wir beziehen uns hierbei auf die von Professor Schäfer entwickelte Typologie der Industriebetriebslehre. Schäfer, E.: Der Industriebetrieb. Industriebetriebslehre auf typologischer Grundlage. Bd. 1. Köln-Opladen 1969, S. 158 ff. Nähere Kennzeichnungen der beiden wichtigsten Systeme finden sich in den Dissertationen: Krämer, E.: Das Werkstättensystem - Insbesondere seine Entwicklung, seine Formen und seine Auswirkungen. Diss. Nürnberg 1969 und Reiners, H.: Erscheinungsformen der Fließfertigung. Diss. Nürnberg 1968.

Von den Fertigungssystemen mit ihrem Kriterium der Anordnung der Produktionsmittel wollen wir zur typisierenden Unterscheidung operationsanalytischer Modellbildung innerhalb der Fertigungsablaufplanung nur zwei Fälle, die der Fließ- und Werkstättenfertigung,¹⁾ betrachten.

Innerhalb der Fließ- oder Reihenfertigung ist für uns weniger die naturbedingte Zwangslauffertigung, deren Ablauf technisch unabdingbar festgelegt ist, sondern die "organisierte Fließfertigung"²⁾ von Interesse. Hauptkriterium ist hier eine nach dem Produktionsfluß ausgerichtete Apparatur mit einem bestimmten Arbeitstakt.

Die Werkstattfertigung mit ihrer örtlichen Zusammenfassung gleicher Maschinentypen oder Arbeitsplätze bildet das andere Extrem. Dieses Fertigungssystem, bei dem die einzelnen Teilstadien des Fertigungsablaufes nicht vorgegeben sind und hintereinander folgen, sondern ganz beträchtliche Unterschiede im Durchlauf bestehen können, stellt das Hauptgebiet allgemeiner und auch operations-

1) Die Werkbank- und Baustellenfertigung ist insgesamt gesehen operationsanalytischen Verfahren nicht besonders gut zugänglich. Dies zeigt sich vor allem bei Bezugnahme auf die noch zu besprechenden allgemeinen Kriterien operationsanalytischer Anwendungsmöglichkeit. Besonders das Vorherrschen mehr schöpferischer Tätigkeiten und das Fehlen der "repetition of action" sind Kriterien, die die Anwendung einschränken. Das schließt nicht aus, daß z.B. einfache Beispiele der Verfahrensauswahl mit Linear Programming oder der Terminplanung mit Hilfe der Netzwerkanalyse innerhalb dieser Fertigungssysteme auftreten und gelöst werden können. Die Problemstrukturen ähneln insgesamt vergleichbaren Beispielen des Werkstätensystems, während die Ablaufprobleme der Fließfertigung ganz anderer Natur sind.

2) Vgl. die Erörterungen von Dick, R.: Zur Prozeßplanung der Fließfertigung. Diss. Köln 1966, S. 11 - 13. S. 12: "Fließfertigung ist eine örtlich fortschreitende, zeitlich bestimmte, lückenlose Folge von Arbeitsgängen." Der Zeitabstimmung gilt dabei das besondere Interesse operationsanalytischer Ablaufplanung bei der Fließfertigung.

analytischer Fertigungsablaufplanung dar. Zwischentypen der beiden obengenannten Fälle mit teilweiser Anordnung nach der Prozeßfolge und teilweiser örtlicher Zusammenfassung von Maschinen sind im allgemeinen, wegen der schwierigeren und komplexeren Zusammenhänge, operationsanalytischen Anwendungen weniger gut zugänglich.¹⁾ Genaue Auskunft über die Anwendungsmöglichkeit kann allerdings hier nur die Einzeluntersuchung erbringen.

4. Problemstellung der Ablaufplanung bei der Fließfertigung und die operationsanalytischen Lösungsversuche²⁾

a) Problemstellung

Bei der Fließfertigung werden die einzelnen Objekte innerhalb eines stets gleichbleibenden Zeitintervalles von einer Bearbeitungsstation zur nächstfolgenden gebracht. Dieses Zeitintervall ist der Grundtakt der Straße und gleichzeitig die Verweilzeit³⁾ des Objektes auf jeder von ihm zu durchlaufenden Station. Einzelne Arbeitselemente⁴⁾ müssen daher so zu einer Verrichtung zusammenge-

1) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 17

2) Vgl. im einzelnen Zimmermann, W.: a.a.O., S. 93 - 106;
Hoss, K.: a.a.O., S. 22 - 25;
Dick, R.: a.a.O., S. 16 - 27; Dick definiert die einzelnen Begriffe, die zur optimalen Fließbandbestimmung notwendig sind.

3) Innerhalb dieses Grundtaktes können in den einzelnen Arbeitsstellen (work stations) Leerzeiten auftreten, die mit den einzelnen Operationszeiten - die Zeiten, die effektiv am Produkt gearbeitet werden - die Gesamtdurchlaufzeit ergeben. Vgl. Dick, R.: a.a.O., S. 23/24

4) "A minimum rational work element is an indivisible element of work, or natural minimum work unit, beyond which assembling work cannot be divided rationally."
Kilbridge, M. - Wester, L.: The Balance Delay Problem.

faßt werden (Elementaggregation), daß die benötigte Ausführungszeit (Operationszeit)-der Arbeitstakt - den Grundtakt nicht überschreitet. Die Arbeitstakte der Bearbeitungsstationen sollen den Grundtakt der Straße aber auch so wenig wie möglich unterschreiten, denn jede Zeitdifferenz zwischen Grundtakt und Arbeitstakt ist eine Verlustzeit, und zwar gleichermaßen eine Wartezeit des Objektes, wie auch eine Leerlaufzeit der Verrichtungsträger dieser Bearbeitungsstation. So stellt sich also die Ablaufgestaltung der Fließfertigung als zeitliches Abstimmungsproblem von Grund- und Arbeitstakt dar, in der amerikanischen Literatur allgemein als line balancing¹⁾ bezeichnet.

Ein einfaches Beispiel macht diesen Zusammenhang deutlich.²⁾

i = 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21

t_i = 4 3 3 2 3 3 2 3 2 2 3 3 4 3 3 2 2 3 4 4 2

4) Fortsetzung von Seite 117:

In: Mgmt. Sci. 1962 (8), S. 69 - 84, hier S. 70. Das "rationally" bezieht sich auf wirtschaftlich sinnvoll. Ein vergleichbarer deutscher Begriff existiert bei Nordsieck, F.: Betriebsorganisation. Lehre und Technik. Bd. 1 u. 2. Stuttgart 1961, hier Bd. 1, S. 121 bzw. Bd. 2, S. 30: "Arbeitselemente sind letzte nicht mehr als verschieden erkennbare Elemente einer Verrichtung - Basiselemente oder Therbligs genannt." (Therblig Umkehrung des Namen Gilbreth). Dagegen sind Arbeitsgang und Griffelement anders abgegrenzt. Vgl. zum Begriff "Griffelement" Waffenschmidt, W.G.: Technik und Wirtschaft der Gegenwart. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1952, S. 151. Die einzelnen Arbeitselemente unterliegen gewissen Restriktionen, d.h. sie können nur in einer bestimmten Reihenfolge zusammengefaßt werden (Reihenfolgerestriktionen): Weitere Beschränkungen sind Betriebsmittel- und Lagerrestriktionen. Vgl. Dick, R.: a.a.O., S. 28 - 35

1) Ebenfalls gebräuchlich sind die Ausdrücke "assembly line balancing" und "production line balancing".

2) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 100/101

$$\sum_{i=1}^{21} t_i = 60;$$

Diese Arbeitselemente sollen nun zu Verrichtungen zusammengefaßt und auf Bearbeitungsstationen aufgeteilt werden. Dabei können höchstens $z = 21$ Bearbeitungsstationen gebildet werden. Im folgenden sollen 5 verschiedene Ablaufstrukturen mit jeweils anderer Stationsenzahl untersucht werden, wobei gilt:

z = Bearbeitungsstation

t = Grundtakt

d = Durchlaufdauer

$\sum t_i$ = Summe der Operationszeiten (Verrichtungszeiten)

$$l = \text{Leerlaufzeit: } l = z \cdot t - \sum_{i=1}^z t_i$$

	z	t	$d = z \cdot t$	$\sum t_i$	l
(1)	3	20	60	60	0
(2)	4	15	60	60	0
(3)	6	10	60	60	0
(4)	15	5	75	60	15
(5)	21	4	84	60	24

Als Elementaggregation zu den Bearbeitungsstationen erhalten wir dann folgende Ablaufstrukturen:

$i = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 14 \ 15 \ 16 \ 17 \ 18 \ 19 \ 20 \ 21$

(1)	4	3	3	2	3	3	2	3	2	2	3	3	4	3	3	2	2	3	4	4	2
(2)	4	3	3	2	3	3	2	3	2	2	3	3	4	3	3	2	2	3	4	4	2
(3)	4	3	3	2	3	3	2	3	2	2	3	3	4	3	3	2	2	3	4	4	2
(4)	4	3	3	2	3	3	2	3	2	2	3	3	4	3	3	2	2	3	4	4	2
(5)	4	3	3	2	3	3	2	3	2	2	3	3	4	3	3	2	2	3	4	4	2

In den Ablaufstrukturen (4) und (5) zeigt sich deutlich der Unterschied zwischen Grundtakt und Arbeitstakt. Die

Leerlaufzeitenbestimmung mit

$$l = z \cdot t - \sum_{i=1}^z t_i$$

gibt aber auch deutlich die "relative Unrichtigkeit" der bisher unter Verwendung der ceteris paribus-Klausel in der Literatur unternommenen Lösungsversuche wieder, nämlich

- a) die minimale Anzahl der Bearbeitungsstationen bei gegebenem Grundtakt und
- b) den minimalen Grundtakt bei einer bestimmten Anzahl von Bearbeitungsstationen zu bestimmen.¹⁾

An ihre Stelle müßte die simultane Optimierung von Grundtakt und Stationsanzahl treten, die aber mit den heutigen Mitteln noch nicht möglich ist.²⁾

Als Zielsetzungen operationsanalytischer Behandlung des Abstimmungsproblems lassen sich zwei verschiedene Schwerpunkte herauskristallisieren: Einmal die Minimierung des Grundtaktes,³⁾ was zu einer Maximierung der Ausbringungsmenge führt, und damit zur Erlös- bzw. Gewinnmaximierung, wobei allerdings eine konstante Anzahl von Bearbeitungsstationen unterstellt werden muß.^{4) 5)}

-
- 1) Als erster und einziger hat bisher Bryton ein Modell mit der Minimierung der Grundzeit als Zielfunktion formuliert. Vgl. Bryton, B.: Assembly Line Balancing Problem. Evanston, Illinois. Northwestern University 1954 (Unpublished Master of Science Thesis) zitiert nach Dick, R.: a.a.O., S. 76
 - 2) Vgl. den theoretischen Ansatz bei Dick, R.: a.a.O., S. 121 - 130
 - 3) Als unterste Grenze des Grundtaktes ergibt sich im äußersten Falle die längste Zeit der Arbeitselemente. Im Normalfall läßt sich dies jedoch nicht erreichen.
 - 4) Vgl. Dick, R.: a.a.O., S. 62/63
 - 5) Die Grundtaktminimierung schließt auch die Minimierung der Realisationsdauer des Gesamtprogramms ein, wie es von Zimmermann, W.: a.a.O., S. 98/99 herausgestellt wird.

Zum anderen die Minimierung der Leerlaufzeiten oder der damit identischen Minimierung der Anzahl der Bearbeitungsstationen.

Wird nämlich die Zahl der Arbeitsstellen möglichst gering angenommen und werden die Arbeitselemente innerhalb etwaiger Beschränkungen darauf verteilt, so wird die Gesamt leerzeit geringer sein als bei einer größeren Anzahl von Arbeitsstellen. Dies ergibt sich auch aus unserem angeführten Beispiel und läßt sich aus der Gleichung der Leerzeitenbestimmung ohne weiteres herleiten. Mit der Leerzeitenminimierung und der sich daraus ergebenden Reduzierung der Bearbeitungsstellen erhalten wir aber auch eine Kostenminimierung,¹⁾ da die Anzahl der Bearbeitungsstationen die bestimmenden Faktoren für das Kostenniveau des Betriebes darstellt.²⁾

Die eben angeführten gegenläufigen Zielsetzungen der Erlös- bzw. Gewinnmaximierung durch Grundtaktminimierung und der Kostenminimierung durch Minimierung der Leerlaufzeiten bzw. Anzahl der Bearbeitungsstationen können wir als "Dilemma der Fließfertigung"³⁾ bezeichnen, vergleichbar dem noch aufzuzeigenden, in der Literatur durch GUTENBERG eingeführten "Dilemma der Ablaufplanung" beim Werkstattensystem.

b) Operationsanalytische Lösungsversuche

Die operationsanalytische Behandlung des Abstimmungspro-

1) Voraussetzung hierfür ist die Unterstellung, daß jeder Einheit der Leerzeit der gleiche Kostenkoeffizient zugrunde liegt. Nur dann fallen Leerzeiten- und Kostenoptimum zusammen. Als praktische Erklärung für ein Auseinanderfallen der beiden Optima bieten sich unterschiedliche Kostenkoeffizienten bei Leerzeiten an teuren und billigen Bearbeitungsstationen an.

2) Vgl. Dick, R.: a.a.O., S. 64/65

3) Vgl. Dick, R.: a.a.O., S. 120/121

blems der Fließfertigung ist überaus vielfältig und soll hier nur in Form eines Überblicks aufgeführt werden.¹⁾ Allgemein lassen sich dabei drei Verfahrenskomplexe unterscheiden:²⁾

- Analytische Modelle mit der Suche nach einer exakten Lösung über einen direkten Lösungsweg zeichnen sich durch einen erheblichen Rechenaufwand und geringe praktische Bedeutung aus. Dazu gehören
 - (a) das Modell von BRYTON,
 - (b) die ganzzahlige lineare Optimierung mit
 - dem Modell von SALVESON;³⁾
 - den Modellen von BOWMAN⁴⁾ mit unterschiedlichen Zielfunktionen;
 - dem Modell von WEDEKIND.⁵⁾
 - (c) die dynamische Optimierung mit dem
 - Modell von JACKSON⁶⁾ und dem
 - Modell von HELD, KARP und SHARESHIAN.⁷⁾

-
- 1) Im einzelnen vergleiche Dick, R.: a.a.O., S. 71 - 110 und die folgende Literatur
 - 2) Die Probleme gehen alle - Ausnahme Bryton - von einem gegebenen Grundtakt aus und streben die Minimierung der Anzahl der Bearbeitungsstationen an.
 - 3) Vgl. Salveson, M.E.: The Assembly Line Balancing Problem. In: J.Ind.Engng. 1955 (6), S. 18 - 25
 - 4) Vgl. Bowman, E.H.: Assembly - Line Balancing by Linear Programming. In: JORSA 1960 (8), S. 385 - 390; vgl. dazu die Vereinfachungen durch White, W.: Comment on a Paper by Bowman - Letters to the Editor. In: JORSA 1961 (9), S. 274 - 276
 - 5) Vgl. Wedekind, H.: Ein linearer Programmsatz für das Fließbandproblem. In: Ablauf- und Planungsforschung 1963 (4), S. 246 - 248
 - 6) Vgl. Jackson, J.R.: A Computing Procedure for a Line Balancing Problem. In: Mgmt. Sci. 1956 (2), S. 261 - 271
 - 7) Held, M. - Karp, R.M. - Shreshian, R.: Assembly - Line Balancing - Dynamic Programming with Precedence Constraints. In: JORSA 1963 (11), S. 442 - 459

- Durch die Verwendung der Netzwerkanalyse bei der Konstruktion eines Fließbandes, bei der sämtliche zulässigen Arbeitsstellenbelegungen durch die Wege von Anfang bis zum Ende des Netzwerkes dargestellt werden, versuchen KLEIN¹⁾ und GUTJAHR-NEMHAUSER²⁾ das Abstimmungsproblem zu lösen. Allerdings eignen sich beide Verfahren nur für kleinere praktische Probleme bis zu 100 Arbeitselementen.

- Als für die praktische Bearbeitung am wichtigsten haben sich beim Abstimmungsproblem die heuristischen Verfahren erwiesen. Diese heuristischen Verfahren bestehen aus Prinzipien und Anweisungen, die bewirken oder dazu beitragen, daß eine Verringerung des Arbeitseinsatzes zur Bestimmung einer Lösung gewährleistet ist.³⁾ Allerdings wird damit keine optimale Lösung garantiert.⁴⁾ An Lösungen sind bekannt geworden:
 - (a) Die "Methode der nach Lage geordneten Gewichtung" (ranked positional weight technique) von HELGERSON und BIRNIE,⁵⁾
 - (b) die Erweiterung durch MANSOOR⁶⁾

-
- 1) Vgl. Klein, M.: On Assembly Line Balancing. In: JORSA 1963 (11), S. 274 - 281. Er interpretiert es auch als Zuordnungsproblem.
 - 2) Vgl. Gutjahr, A.L. - Nemhauser, G.L.: An Algorithm for the Line Balancing Problem. In: Mgmt. Sci. 1965 (11) A, S. 308 - 315
 - 3) "Thus, by heuristics we mean principles or devices that contribute, on the average, to reduction of search in problemsolving activity." Tonge, Fred, M.: Summary of a Heuristic Line Balancing Procedure. In: Mgmt. Sci. 1961 (7), S. 21 - 42, hier S. 24/25
 - 4) Vgl. einige allgemeine Kriterien heuristischen Vorgehens bei Tonge, F.M.: Summary ..., a.a.O., S. 25
 - 5) Vgl. Helgerson, W.B. - Birnie, D.P.: Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique. In: J.Ind.Engng. 1961 (12), S. 394 - 398
 - 6) Vgl. Mansoor, E.M.: Assembly Line Balancing - An Improvement on the Ranked Positional Weight Technique. In: J.Ind.Engng. 1964 (15), S. 73 - 77

- (c) das Verfahren von HOFFMANN¹⁾
- (d) das Modell von KILBRIDGE und WESTER²⁾
- (e) das Modell von TONGE.^{3) 4)}

Abschließend können wir feststellen, daß mit den hier angegebenen Modellen nur relativ einfache Fälle behandelt worden sind.⁵⁾

Mit zunehmender Konsolidierung wird sich Operations Research aber auch der komplexeren Probleme annehmen können, um sie wenigstens einer gedanklichen Durchdringung zuzuführen.⁶⁾

5. Problemstellung der Ablaufplanung bei der Werkstattfertigung und die operationsanalytischen Lösungsversuche

a) Problemstellung

Die Problemstellung der Ablaufplanung in der Werkstattfertigung ist beherrscht vom "Dilemma der Ablaufplanung",⁷⁾ das durch die beiden gegenläufigen Forderungen

-
- 1) Vgl. Hoffmann, Th. R.: Assembly Line Balancing with a Precedence Matrix. In: Mgmt. Sci. 1963 (9), S. 551 - 562
 - 2) Vgl. Kilbridge, M.D. - Wester, L.: A Heuristic Method of Assembly Line Balancing. In: J.Ind.Engng. 1961 (12), S.292 - 298
 - 3) Vgl. Tonge, F.M.: Summary ..., a.a.O., S. 21 - 42
 - 4) Nähere Einzelheiten über diese Modelle finden sich auch bei Dick, R.: a.a.O., S. 95 - 111
 - 5) Als Lösungsmethode fand weitgehend die Simulation Verwendung
 - 6) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 409
 - 7) Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., Bd. 1, 12. Aufl., S. 213/214

der besten **Ausnutzung** der Produktionsmittelkapazität und der Ermöglichung der geringsten Durchlaufzeit gekennzeichnet ist.¹⁾

Gehen wir von einer Mehrproduktunternehmung mit M Maschinengruppen aus, für dessen J Produkte des momentanen Fertigungsprogrammes die technologischen Bearbeitungsfolgen und die einzelnen Operationszeiten gegeben sind, so bilden sich durch Überschneidungen der Arbeitsfolgen der verschiedenen Aufträge auf den einzelnen Maschinengruppen laufend Situationen, in denen ein Arbeitsplatz gleichzeitig von mehreren Aufträgen beansprucht wird.²⁾ Diese Bildung von Engpässen und von Auftrags-Warteschlangen versucht man durch eine optimale Ablaufplanung zu vermeiden. Dabei erweist es sich, daß, je größer die Zahl der in alternativer Produktion zu fertigenden verschiedenen Produkte ist, um so schwieriger die allgemeine bzw. operationsanalytische Ablaufplanung und die mit ihr verbundene Belastungskontrolle wird.³⁾ Unter dem Gesichtspunkt der Verwirklichung des Massenprinzips zeigt sich, daß die reine Einzelfertigung gegenüber den Verhältnissen bei kleinerer oder größerer Serien- und Sortenfertigung schwieriger zu erfassen ist.⁴⁾ Hauptkriterien für die Schwierigkeit der Fertigungsablaufplanung sind, neben der Zahl der Maschinen (-gruppen), insbesondere die Zahl der verschiedenartigen Produkte bzw. Aufträge, wobei die hergestellte Anzahl der einzelnen Produkte von sekundärer Bedeutung für die Ablauffolge - sachlicher Gesichtspunkt - nicht aber für eine etwaige Terminbestimmung ist - zeitlicher Gesichtspunkt. Überschneidungen bei der Bearbeitung der Aufträge

1) Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 80

2) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 19

3) Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 80/81

4) Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 80/81

auf den einzelnen Maschinen(-gruppen)¹⁾ lassen sich durch genaue zeitliche Festlegung der Arbeitsgänge und durch Bestimmung der Ablauffolgen der J Produkte auf den M Maschinen vermeiden, wenn man dabei bereit ist, ablaufbedingte Leer- oder Brachzeiten der Maschinen in Kauf zu nehmen.²⁾ Das Hauptaugenmerk gilt hier dem schnellen Durchschleusen des Auftrages durch alle Arbeitsplätze.³⁾ Sofern diese Leerzeiten nicht für andere Aufträge weiterverplant werden können, ergeben sich hieraus Warteschlangen von Aufträgen vor den einzelnen Arbeitsplätzen und damit arbeitsablaufbedingte Warte- und Liegezeiten der Aufträge.⁴⁾ Die dabei verursachten Zwischenlager rufen eine, im Verhältnis zu den Eingangslagerbeständen, hohe Kapitalbindung hervor, da in ihren Werten auch Fertigungs- und Verwaltungskosten enthalten sind. In der Abstimmung der Kosten der Zwischenlagerung und den Stillstands- bzw. Leerkosten der Maschinen liegt ein echtes Optimierungsproblem, wobei einerseits die Durchlaufzeit minimiert und gleichzeitig der Kapazitätsausnutzungsgrad maximiert werden soll.⁵⁾ Dieses "Dilemma" kann beim Werkstattensystem durch die Berücksichtigung von Zeitpunkten, an denen bestimmte Aufträge erledigt sein sollen, noch schwieriger werden.⁶⁾

Als Faktoren dieser Ablaufplanung lassen sich neben dem schon besprochenen Fertigungssystem das Fertigungspro-

1) Wir setzen im folgenden Maschinen gleich Maschinen-gruppen.

2) Voraussetzung ist, daß eine entsprechende Kapazität überhaupt zur Verfügung steht.

3) Vgl. die Zielsetzung der Grundtaktminimierung bei der Fließfertigung.

4) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 19/20

5) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 20. Der Kapazitätsausnutzungsgrad wird durch Minimierung der ablaufbedingten Leerzeiten maximiert.

6) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 21

gramm, die Produkte, die Produktionsmittel und die menschliche Leistungsfähigkeit anführen, auf die aber hier nicht weiter eingegangen werden soll.¹⁾ Die Daten dieser Faktoren sowie die Termine und Zeiten gehen als Parameter in eine operationsanalytische Fertigungsplanung ein.

b) Optimierungsziele operationsanalytischer Fertigungsablaufplanung

Die Komplexität der Ablaufplanung hat in den bisherigen operationsanalytischen Problemformulierungen dazu geführt, daß neben Ertrags- und Kostenüberlegungen bei einzelnen Teilproblemen auch andere Optimierungsziele angeführt worden sind, die zum Teil in keiner eindeutigen Beziehung zueinander stehen. CHURCHMAN, ACKOFF, ARNOFF sagen dazu, daß "dieses Abwägen einander widerstreitender Ziele in die Formulierung des Ablaufplanungs-Problems noch keinen Eingang gefunden hat."²⁾

Als einzelne Optimierungsziele sind neben Kosten- und Ertragsüberlegungen bisher verwendet worden:

- (1) Maximierung der periodenbezogenen Kapazitätsausnutzung,
- (2) Minimierung der mittleren Durchlaufzeit der Aufträge,
- (3) Minimierung der Belegungszeit. - Diese Formulierung ist der Maximierung der Kapazitätsausnutzung gleichzusetzen,
- (4) Minimierung der gesamten Leerzeit. - Dieses aus (1) deduzierte Ziel findet bei den bisherigen opera-

1) Dazu sei auf Ellinger, Th.: a.a.O., S. 19 - 36 und Hoss, K.: a.a.O., S. 25 - 36 verwiesen

2) Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 409

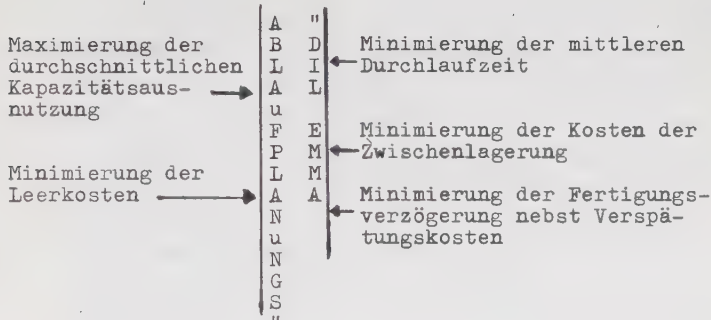
- tionsanalytischen Verfahren am meisten Verwendung.¹⁾
- (5) Minimierung der gesamten bzw. mittleren Wartezeit.
Diese Formulierung ist mit (2) identisch.²⁾

Neben den obengenannten Optimierungszielen mit dem Hauptaugenmerk auf Belegungs- und Verarbeitungszeiten sind weitere Ziele formuliert worden, die sich aus einer anderen Problematik ergeben.

- (6) Minimierung der Fertigungsverzögerungen und der Verspätungskosten (Konventionalstrafe).³⁾
- (7) Minimierung der mittleren Anzahl der im Fertigungsablauf gebundenen Aufträge zur Senkung der Kapitalbindung.
- (8) Minimierung der Kosten der Zwischenlagerung.
- (9) Optimierung der Anzahl der Bearbeitungsstationen.⁴⁾

-
- 1) Vgl. Johnson, S.M.: Optimal Two- and Three-Stage Production Schedules with Setup Times Included. In: Industrial Scheduling. Hrsg.: Muth, J.F. - Thompson, G.L. Englewood Cliffs, N.J. 1963, S. 13 - 20;
Mitten, L.G.: A Scheduling Problem. In: J.Ind.Engng. 1959 (10), S. 131 - 134. This includes results of Mittens "Sequencing in Jobs on Two Machines with Arbitrary Time Lags. In: Mgmt. Sci. 1959 (5), S. 293 - 298;
Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 410 - 433;
Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 256 - 270;
Bowman, E.H.: The Schedule Sequencing Problem. In: JORSA 1959 (7), S. 621 - 624;
Manne, A.S.: On the Job-Shop-Scheduling Problem. In: JORSA 1960 (8), S. 219 - 223;
Wagner, H.M.: An Integer Linear Programming Model for Machine Scheduling. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1959 (6), S. 131 - 140
- 2) Vgl. Rowe, A.J.: Toward a Theory of Scheduling. In: J.Ind.Engng. 1960 (11), S. 125 - 136
- 3) Vgl. Jackson, J.R.: Simulation Research on Job Shop Production. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1957 (4), S. 287 - 295
- 4) Vgl. Conway, R.W. - Maxwell, W.L.: Network Dispatching by the Shortest Operation Discipline. In: JORSA 1962 (10), S. 51 - 73

Insgesamt lassen sich die Optimierungsziele in zwei gegenläufige - das Dilemma der Ablaufplanung in der Werkstättenfertigung symbolisierende - Hauptgruppen zusammenfassen:



c) Die Darstellung des Zuordnungsproblems und die Planungsbereiche der operationsanalytischen Fertigungsablaufplanung

Die im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Optimierungsziele sind im wesentlichen Ausdruck des sogenannten Zuordnungsproblems der operationsanalytischen Fertigungsablaufplanung. Dabei handelt es sich unter dem Gesichtspunkt des Planungsbereichs um eine kurzfristige Betrachtung (Terminfeinplanung), bei der vor allem die Operationszeiten¹⁾ als bekannt vorausgesetzt werden. Diese Operationszeit, in Verbindung mit Förder-, Montage- und ablaufbedingten Liege- oder Wartezeiten als Durchlaufzeit²⁾ bezeichnet, ergibt nun durch die zeitli-

1) Die Operationszeit des Auftrages j auf der Maschine m besteht aus Rüst- und Nutzzeit.

2) Die Durchlaufzeit setzt sich aus Operationszeit (Rüst- und Nutzzeit), Förderzeit, Montagezeit sowie der ablaufbedingten Liegezeit zusammen. Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 38

che Ausdehnung der Fertigung die Verknüpfung zum Faktor Zeit, der in der Form von Fertigungsterminen als besondere Erschwernis der Fertigungsablaufplanung in Erscheinung tritt. Wollen wir diesen Faktor Zeit unter Planungsgesichtspunkten besonders berücksichtigen, so können wir dies nur, indem wir von einer anlagen- bzw. auftragsbezogenen Termingrobplanung zu einer Terminfeinplanung fortschreiten. Als Terminfeinplanung tritt dann wiederum das Zuordnungsproblem auf. Innerhalb der Termingrobplanung ergeben sich nun ebenfalls Operations-Research-Probleme, die als Zeitprobleme der Fertigungsablaufplanung im Anschluß an das Zuordnungsproblem behandelt werden, obwohl man planungstechnisch immer den Weg von der Grobplanung zur Feinplanung gehen muß.¹⁾ Um den Zusammenhang zum wichtigsten Ablaufplanungsproblem (Zuordnungsproblem) nicht zu verlieren, stellen wir in der verbalen Darstellung - anders in der zeichnerischen Übersicht zu Beginn dieses Kapitels - zuerst das kurzfristige Zuordnungsproblem dar und schließen daran die Zeitplanungsprobleme der mittelfristigen Ablaufplanung (Termingrobplanung) an.

aa) Aufteilung des Zuordnungsproblems²⁾ in einzelne Phasen³⁾

Die zu Beginn dieses Kapitels aufgeführten 5 Kategorien

1) Rowe teilt in diesem Zusammenhang die Fertigungsablaufplanung ein in:

- Grobbelegung (loading) der Werkstätten und Vergleich der vorhandenen Kapazität. Diese entspricht unserer anlagenbezogenen Termingrobplanung.
- Terminplanung (scheduling): Bestimmung der Durchlaufzeiten und Planung der Haupttermine; unserer auftragsbezogenen Termingrobplanung vergleichbar.
- Arbeitsverteilung (dispatching): Die Zuordnung jedes Auftrages zu bestimmten Zeiten auf bestimmte Maschinen innerhalb der Zeitperiode. (Zuordnungsproblem). Vgl. Rowe, A.J.: Toward a Theory of Scheduling. In: J.Ind.Engng. 1960 (11), S. 125 - 136, hier S. 126

2) Fußnote siehe Seite 131

3) Fußnote siehe Seite 131

der Fertigungsablaufplanung, welcher Auftrag nach welchem Verfahren mit welchen Maschinen oder Arbeitskräften¹⁾ zu welchem Zeitpunkt zu bearbeiten ist, lassen sich planungstechnisch in drei Phasen zerlegen:

- (1) Die Festlegung der technischen Bearbeitungsfolge der Erzeugnisse.

Mit Hilfe von Konstruktionsunterlagen wird die Reihenfolge der Bearbeitungsverfahren festgelegt.

- (2) Die Festlegung der Bearbeitungsfolge der Erzeugnisse auf bestimmte Maschinen.

Die Abstimmung der Bearbeitungsfolge mit der Maschinenfolge bedarf wegen der technischen Eigenschaften der Maschinen oder Maschinengruppen besonderer Planungsaufmerksamkeit.²⁾ Ergeben sich bei der Wahl der

-
- 2) Fußnote von Seite 130:

Der Bereich des hier dargestellten Problems reicht weiter als das auch manchmal in deutschen Übersetzungen so bezeichnete "Zuordnungsproblem" (allocation problem); es ist in obigem Zuordnungsproblem mit eingeschlossen.

- 3) Fußnote von Seite 130:

Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 46 - 55;
Zimmermann, W.: a.a.O., S. 107 - 144

- 1) Maschinen und Arbeitskräfte können zusammengefaßt betrachtet werden, da wir deren Leistungsvermögen als kapazitätsbestimmenden Faktor betrachten.
- 2) Die Bestimmung der technologischen Bearbeitungsfolge auf den Maschinen ist unter "problem of routing" in der amerikanischen Literatur bekannt. Vgl. Sisson, R.L.: Methods of Sequencing in Job Shops - A Review, In: JORSA 1959 (7), S. 10 - 29, hier S. 11/12.

Wir unterscheiden folgende Problemtypen:

- (1) Die Reihenfolge kann für alle Erzeugnisarten exakt dieselbe sein (Identical Routing, No Passing);
- (2) beim einzelnen Erzeugnis werden Arbeitsgänge übersprungen (Identical Routing, Passing Permitted);
- (3) die Reihenfolge ist bei jedem Erzeugnis eine völlig andere (Different Routing)

Vgl. Littger, K.: Bearbeitung komplexer Reihenfolgeprobleme mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen. IBM-Fachbibliothek, Form 78100.10.63

zu benützenden Maschinen technische Alternativmöglichkeiten mit wirtschaftlichen Auswirkungen, so erhalten wir ein erstes abgegrenztes Optimierungsproblem. Dieses Problem der optimalen Verfahrensauswahl - hier besser Maschinenwahl - besteht in der Berechnung der Zuordnung der einzelnen Aufträge auf die Maschinengruppen mit verschiedenen Kapazitäten und Produktivitäten, so, daß sich insgesamt ein Kostenminimum ergibt. Dabei ist es etwa innerhalb der Glasfabrikation möglich, Schneidaufträge mit den verschiedensten Schneidvorrichtungen unterschiedlicher Produktivität auszuführen, wobei wir die optimale Maschinenauswahl aus der Gesamtkosten- bzw. Gesamtzeitminimierung bestimmen.^{1) 2)} Hierbei handelt es sich um das sogenannte Zuweisungsproblem (assignment problem) - oder im Spezialfall um eine Erweiterung desselben -, bei dem allgemein Aufträge auf Angestellte/Arbeiter/Maschinen so aufgeteilt werden, daß die Erfüllung des gesamten Programmes ertrags- oder kostenoptimal durchgeführt wird.³⁾

Auch die Frage, wie ein gegebener Auftrag optimal auf Eigen- und Fremdherstellung bei Beachtung der

-
- 1) Vgl. dazu unser Beispiel im praktischen Teil dieser Arbeit.
 - 2) Beispiele in der Literatur finden sich bei: von Rago, L.J.: Operations Research im Industriebetrieb. Zum Problem optimaler Kapazitätsausnutzung. In: ZfB 1962 (32), S. 403 - 418, hier S. 403 - 414 und Krekó, B.: Lehrbuch der linearen Optimierung. Berlin 1964, S. 275 - 278. Für besonders illustrativ halten wir das Beispiel von Krekó, B.: a.a.O., S. 278 - 280, bei dem ein vorgegebenes Fertigungsprogramm von drei Produkten auf drei Maschinengruppen mit jeweils zwei unterschiedlichen technologischen Möglichkeiten bei verschiedenem Zeitablauf und Kosten, bei gegebener Kapazität, optimal zugeordnet werden soll.
 - 3) Vgl. Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 195 - 203 sowie unsere Ausführungen im Abschnitt "Mathematische Programmierung".

eigenen Kapazität verteilt werden soll, ist hier zu beantworten.¹⁾ Allgemein ist mit der Zuordnung der drei Kategorien Auftrag (Produkte), Bearbeitungsverfahren und Betriebsmittel die Maschinenfolge bestimmt.²⁾

- (3) In der letzten Phase, der Feststellung der zeitlich optimalen Ablauffolge der Maschinenbesetzung bzw. Auftragsbearbeitung, gilt es, die drei eben angeführten Kategorien (Produkte, Maschinen, Verfahren) unter Berücksichtigung von Zeitpunkten bzw. -abschnitten zu einem zeitlichen Ablaufplan in Form eines Maschinenbesetzungsplanes³⁾ zusammenzufassen. Anders ausgedrückt handelt es sich um die Frage, welche Fertigungsoperationen zu welchem Zeitpunkt

-
- 1) Vgl. Müller-Merbach, H.: Lineare Planungsrechnung und industrielle Anwendung I, II. In: Zeitschrift für das Gesamte Rechnungswesen 1967 (13), S. 48 - 52, S. 89 - 92
- 2) Auf eine spezielle Darstellung der Maschinen- bzw. Bearbeitungsfolge mit Hilfe von Nummernfolgen (vgl. dazu Giffler, B. - Thompson, G.L.: Algorithms for Solving Production Scheduling Problems. In: JORSA 1960 (8), S. 487 - 503) und bei der Zuordnung von Aufträgen mit einer Darstellung der sogenannten Vorrangmatrix, soll hier verzichtet werden, da es sich im wesentlichen nur um rein mathematische Darstellungsprobleme handelt, die auch bei der praktischen Problembehandlung nicht mehr aufgegriffen werden. Zur Verwendung der sogenannten Vorrangmatrix vgl. Hoffmann, Th.R.: Assembly Line Balancing ..., a.a.O., S. 551 - 562 und Helgerson, W.B. - Birnie, D.P.: Assembly Line Balancing ..., a.a.O., S. 394 - 398
- 3) Der Maschinenbesetzungsplan läßt sich anschaulich mit sogenannten Gantt-Charts darstellen. Diese Gantt-Charts können auch beim Auftragsfortschrittsplan - als auftragsbezogener Terminplan bildet er das Pendant zum anlagenbezogenen Maschinenbesetzungsplan - Verwendung finden. Vgl. Magee, J.F.: a.a.O., S. 223 ff.

welchen Bearbeitungsstationen zugeordnet werden sollen.¹⁾

Dieser Fragenkomplex wird in der Operations Research-Literatur als Reihenfolgeproblem²⁾ bezeichnet, da sich die Gesamtherstellungszeit für ein Fertigungsprogramm durch geschicktes Wählen der Auftragsreihenfolge, unter Berücksichtigung der Bearbeitungsfolge, bis zu einem bestimmten Punkt minimieren läßt. Das Maß der Wirksamkeit wird hierbei durch eine Funktion der Ordnungen oder Reihenfolge bestimmt.³⁾ Die bestmögliche dieser Wirksamkeiten unter den (J!)^M-Möglichkeiten herauszufinden, bildet unser Problem. Bei Annahme konstanter Maschinenfolgen reduziert sich die Anzahl möglicher Lösungen auf J!.

bb) Lösungsmöglichkeiten des Reihenfolgeproblems

Der Lösung des Reihenfolgeproblems ist in der Operations Research-Literatur⁴⁾ ein ziemlich breiter Raum gewidmet

-
- 1) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 109 - Für die Verwendung von Linear Programming bei der Lösung ist zu bemerken, daß im Gegensatz zu den üblichen Linear Programming-Modellen mit zwei bzw. drei Kategorien (Produkt, Verfahren, Kapazität) hier mindestens 4 Kategorien zu berücksichtigen sind. Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 50
 - 2) In der anglo-amerikanischen Literatur, auf die wir uns im allgemeinen stützen müssen, wird es als "sequencing problem" oder speziell als "job scheduling" bezeichnet. Es ist von der Planung der technischen Reihenfolge (problem of routing) zu unterscheiden und besteht in einer (kurzfristigen) Terminfeinplanung bei gegebenen Operationszeiten.
 - 3) Auf ein Beispiel soll hier verzichtet werden. Es kann dabei auf Sasiemi, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 256 - 274 verwiesen werden, die das Problem in einfachen Formulierungen wiedergeben.
 - 4) Einen umfassenden Überblick vermittelt Sisson, R.L.: Sequencing Theory. In: Progress in Operations Re-

Fortsetzung siehe Seite 135

worden, ohne daß bisher für die komplexen Probleme der Wirklichkeit ein allgemein gültiger Ansatz gefunden werden konnte. An Lösungsmöglichkeiten sind dabei folgende Ansätze erörtert worden:

(1) Kombinatorische Analyse¹⁾

Grundsätzlich ist für jedes Reihenfolgeproblem die Bestimmung einer Optimallösung möglich, nämlich dann, wenn alle Permutationen durchgerechnet werden. Dies nimmt aber selbst für kleinere Werte riesige Ausmaße an - bei 5 Produkten und 5 Maschinen ergeben sich rund $25 \cdot 10^9$ Möglichkeiten.²⁾ Lösungen mit Hilfe der sogenannten "Kombinatorischen Analyse" gibt es daher nur für spezielle Modelle mit erheblich einschränkenden Bedingungen.³⁾ So versucht man zunächst soweit als möglich auf nichtnumerischem Wege durch allgemeine "Strukturregeln"⁴⁾ die Lösungsanzahl auf eine relativ kleine Zahl leicht überschaubarer und darstellbarer Ergebnisse zu reduzie-

4) Fortsetzung von Seite 134:

search. Bd. 1. Hrsg.: Ackoff, R.L. New York - London 1961, S. 293 - 326 sowie in der deutschsprachigen Literatur Hoss, K.: a.a.O., S. 97 - 170 und Zimmermann, W.: a.a.O., S. 113 - 144

1) Vgl. Sisson, R.L.: Sequencing Theory. a.a.O., S. 306 - 308

2) Vgl. Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 256

3) Vgl. Johnson, S.M.: Optimal ..., a.a.O.; Jackson, J.R.: An Extension of Johnson's Result on Job Shop Scheduling. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1956 (3), S. 201 - 203; Smith, W.E.: Various Optimizers for Single Stage Production. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1956 (3), S. 59 - 66; Mitten, L.G.: A Scheduling Problem ..., a.a.O.; Johnson, S.M.: Discussion. In: Mgmt. Sci. 1959 (5), S. 299 - 303

4) Vgl. Schweitzer, M.: Probleme der Ablauforganisation in Unternehmungen. Berlin 1964, S. 83

ren,^{1) 2)} um dann von hier aus optimale Lösungen anzustreben.³⁾

- (2) Eine andere Lösungsmöglichkeit der Reihenfolgeprobleme ergibt sich mit Hilfe der "ganzzahligen Optimierung". Die Hauptarbeiten hierzu stammen von WAGNER,⁴⁾ BOWMAN,⁵⁾ MANNE⁶⁾ und DANTZIG.⁷⁾

Bisher ist allerdings noch kein Versuch unternommen worden, mit Hilfe eines der obenangeführten Modelle ein praxisbezogenes Problem zu berechnen.⁸⁾

-
- 1) Vgl. Jaeschke, G.: Das Reihenfolgeproblem für Erzeugnisse mit gleichem Ablaufplan (RFI). In: IBM-Form 78104, Böblingen 1963;
ders.: Eine Methode zur Lösung des Reihenfolgeproblems zum Typ "Identical Routing". IBM-Form 78133.9.65;
Littger, K.: Bearbeitung komplexer Reihenfolgeprobleme mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen. In: IBM-Form 78100.10.63;
ders.: Planung und Steuerung von Fertigungsprozessen mit IBM-Datenverarbeitungssystemen. In: IBM-Form 81504.11.65.
- 2) Schon mit der Wahl der Voraussetzungen ist eine solche Reduktion zu erreichen. Die Annahme konstanter Maschinenfolgen für alle Aufträge verringert die Lösungsmöglichkeiten von $J!^M$ auf $J!$.
- 3) Zur Kritik vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 141
- 4) Vgl. Wagner, H.M.: An Integer Linear Programming Model for Machine Scheduling. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1959 (6), S. 131 - 140
- 5) Vgl. Bowman, E.H.: The Schedule Sequencing Problem. In: JORSA 1959 (7), S. 621 - 624
- 6) Vgl. Manne, A.S.: On the Job Shop Scheduling Problem. In: Muth, F.J. - Thompson, G.L. (Ed.): Industrial Scheduling. Englewood Cliffs 1963, S. 187 - 192 und Manne, A.S.: On the Job-Shop-Scheduling Problem, a.a.O.
- 7) Vgl. Dantzig, G.B.: A Machine-Job-Scheduling Model. In: Mgmt. Sci. 1960 (6), S. 191 - 196
- 8) Vgl. Story, A.E. - Wagner, H.M.: Computational Experience with Integer Programming for Job-Shop Scheduling. In: Muth, F.J. - Thompson, G.L. (Ed.): Industrial Scheduling ..., a.a.O., S. 207 - 224

- (3) Als der zur Zeit erfolgversprechendste Lösungsversuch erscheint der der Verwendung der Simulation. Drei Anwendungsmöglichkeiten zeichnen sich ab:¹⁾
- (a) Durch "Strukturregeln" wird die Anzahl der möglichen Lösungen auf einige wenige reduziert, die man mit der Monte-Carlo-Technik einer optimalen Lösung annähert.²⁾
 - (b) Mit Hilfe der Monte-Carlo-Technik wird ohne Verwendung von Strukturregeln die optimale Lösung erreicht.³⁾
 - (c) Die komplexeren Probleme werden durch ein eigenes Simulationsmodell angenähert.⁴⁾ Dabei werden auch reine "Laboratoriumsexperimente" unternommen⁵⁾ sowie sogenannte Prioritätsregeln verwendet.⁶⁾
- (4) In der neueren Entwicklung findet vor allem die Warteschlangentheorie in Verbindung mit Prioritätsre-

1) Sisson, R.L.: Sequencing Theory, a.a.O., S. 305 - 321

2) Vgl. Giffler, B. - Thompson, G.L.: Algorithms for Solving ..., a.a.O., über die simulative Erzeugung von Permutationen vergleiche Seitz, R.: Erzeugung von Permutationen im Rechenautomaten mittels zyklischer Operationen. In: Ufo 1962 (6), S. 2 - 15

3) Vgl. Heller, J.: Combinatorial, Probabilistic and Statistical Aspects of a $M \times J$ Scheduling Problem. AEC-Report NYO 2540, New York 1959 und Smith, W.E.: Applications of A Posteriori Probability. Research Report N^o 56 UCLA, Management Sciences Research Project, Sept. 19, 1958, beide zitiert nach Sisson, R.L.: Sequencing Theory, a.a.O., S. 313 mit S. 326

4) Vgl. Rowe, A.J.: Toward a Theory ..., a.a.O.; Jackson, J.R.: Simulation Research on Job Shop Production. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1957 (4), S. 287 - 295; Baker, C.T. - Zielinski, B.P.: Simulation of a Simplified Job Shop. In: Mgmt. Sci. 1960 (6), S. 311 - 323

5) Vgl. Sisson, R.L.: Sequencing Theory, a.a.O., S. 316

6) Vgl. Rowe, A.J.: Toward a Theory, a.a.O.

geln¹⁾ zur Bewältigung des Reihenfolgeproblems Anwendung.²⁾

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bisher die zur Fertigungsablaufplanung entwickelten kleineren Modelle des Reihenfolgeproblems durch Permutieren und die größeren Modelle mit Simulation gelöst worden sind.³⁾ Dabei ergibt die Lösung, bei Annahme einer gegebenen Maschinenfolgемatrix als technische Reihenfolgebeschränkung und der damit verbundenen Operationszeitenmatrix,⁴⁾ die Auftragsfolgenmatrix und den damit verknüpften Maschinenbesetzungsplan einschließlich der Leerzeitenmatrix. Aus dem Maschinenbelegungsplan läßt sich wiederum der auftragsbezogene Terminplan einschließlich der Wartezeiten ableiten.

Die in diesem Abschnitt gemachten Ausführungen können nur in groben Umrissen die auf diesem Gebiet durchge-

-
- 1) Prioritätsregeln sind z.B.: Kürzeste-Operationszeit-Regel (KOZ); Fertigungsrestzeitregel (der Auftrag mit der kürzesten Fertigungsrestzeit hat den Vorrang); Produktionswertregel und Verspätungsregel; vgl. dazu Hoss, K.: a.a.O., S. 162 - 167 mit der Tabelle über die Wirksamkeit der Prioritätsregeln in bezug auf die verschiedenen Optimierungsziele.
 - 2) Vgl. Jackson, J.R.: Jobshop-Like Queueing Systems. In: Mgmt. Sci. 1963 (10), S. 131 - 142; Reinitz, R.C.: On the Job-Shop Scheduling Problem. In: Industrial Scheduling. Hrsg.: Muth, F.J. - Thompson, G.L. S. 59 - 82; Holt, Ch.C.: Priority Rules for Minimizing the Cost of Queues in Machine Scheduling. In: Industrial ... a.a.O., S. 83 - 98 sowie Hoss, K.: a.a.O., S. 137 - 175 - Dieser Versuch hat auch in der praktischen Verwirklichung zu sehr guten Ergebnissen geführt.
 - 3) Vgl. Zimmermann, W.: a.a.O., S. 144
 - 4) Diese Formulierung des Reihenfolgeproblems bezeichnet Hoss als "primalen Ansatz", im Gegensatz zum "dualen Ansatz", wo er von einer Auftragsfolgемatrix ausgeht, Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 55/56

führten Berechnungen und Versuche andeuten. Wir haben uns aus zwei Gründen auf diesen Überblick beschränkt.

Einmal können wir natürlich im Rahmen dieses Unterkapitels nicht alle Modelle ausführlich erörtern, ohne daß dies zu einer übermäßigen Ausweitung dieser Arbeit führen würde. Zum anderen spielt das operationsanalytische Reihenfolgeproblem wegen der begrenzten Lösungsmöglichkeit in der praktischen Anwendung bisher nur eine untergeordnete Rolle. Auch für eine Anwendung innerhalb der Glasfabrik kommt es nicht in Betracht, so daß diese mehr umrißhafte Behandlung gerechtfertigt erscheint.¹⁾

Dies gilt auch zum Teil für die folgenden Ausführungen.

d) Operationsanalytische Zeitplanungsprobleme

Nachdem wir uns bisher mit den sachlichen Kriterien des "Was", "Wie" und "Womit" bei Annahme gegebener Operationszeiten beschäftigt haben, wollen wir im folgenden die Probleme, die sich aus der allgemeinen Ablaufzeitenbestimmung in Verbindung mit Fertigungsterminen ergeben, einer näheren Untersuchung unterziehen.

Bei der auftragsbezogenen²⁾ Termingrobplanung sind Lie-

1) Dem mit der mathematischen Ausdrucksweise und der operationsanalytischen Behandlung dieses Reihenfolgeproblems wenig vertrauten Leser wird es in diesem Abschnitt nicht immer leicht gewesen sein, den sehr gerafften Ausführungen zu folgen. Ihn müssen wir bei Einzelproblemen in der deutschsprachigen Literatur auf Hoss, K.: a.a.O., und in der amerikanischen Literatur auf die Zusammenfassung von Sisson, R.L.: Sequencing Theory, a.a.O., verweisen. Bei letzterem besonders auf die tabellarische Übersicht der Problembehandlung der einzelnen Autoren. Vgl. Sisson, R.L.: Sequencing Theory, a.a.O., S. 302/303

2) Eine anlagenbezogene Termingrobplanung bezieht sich mehr auf die Berechnung der Kapazitätsausnutzung. Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 73

fertermine und Kapazitätsauslastung in eine ungefähre Abstimmung zu bringen. Dazu sind die Durchlaufzeit und die einzelnen Haupttermine der Arbeitsabschnitte zu ermitteln, was unter Umständen mit Schwierigkeiten verbunden sein kann. Z.B. bedarf es bei Einzelfertigung größerer Objekte zur Durchlaufzeitbestimmung oft des Einsatzes der aktivitätsorientierten¹⁾ Netzwerkanalyse zur Terminplanung, besonders dann, wenn die Erfüllung des Liefertermins von größerer Bedeutung als der Preis ist.²⁾ Wir können in diesem Zusammenhang auf unsere Ausführungen über die Netzwerkanalyse, spezieller Zeitplanung, verweisen. Unser besonderes Interesse gilt dabei der sogenannten Durchlaufzeit, die bei einem, aus mehreren Übernahmeteilen bestehenden, Auftrag aus der Bearbeitungs- und Montagezeit entlang des kritischen Pfades besteht. Die Bearbeitungszeit setzt sich dabei aus der Operationszeit als Summe von Rüst- und Nutzzeiten und der Transportzeit, gegebenenfalls mit arbeitsablaufbedingten Liegezeiten, zusammen.

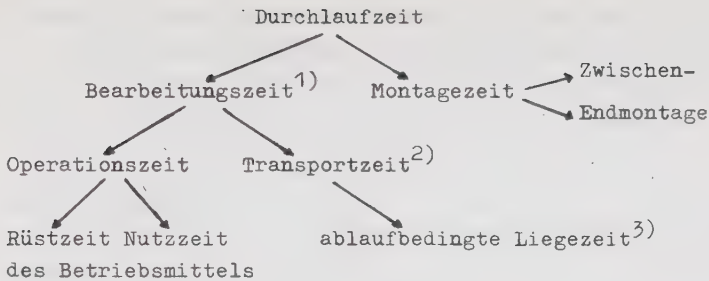
Schematisch ergibt sich für die Zusammensetzung der Durchlaufzeit folgendes Bild (siehe Seite 141).

Aus dem Netzwerk lassen sich dann ohne Schwierigkeiten Ecktermine für einzelne Arbeitsabschnitte berechnen.

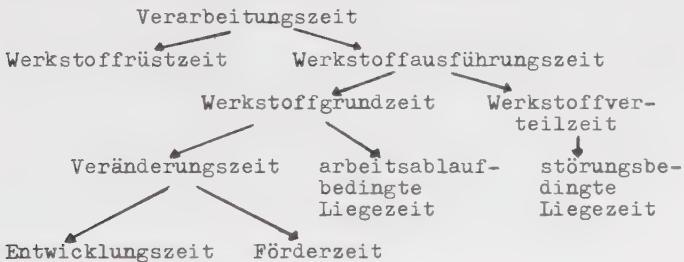
Die Ermittlung der Durchlaufzeit ist nun in der Praxis oft mit solch erheblichen Schwierigkeiten verbunden, daß man versucht hat, die Durchlaufzeit mit anderen Hilfs-

1) Eine aktivitätsorientierte Netzwerkdarstellung stellt CPM dar. Den Gegensatz bildet eine ereignisorientierte Darstellung (z.B. PERT). Vgl. Teil 1/A/III/4

2) Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 107



- 1) Bei der Bearbeitungszeit handelt es sich um eine Zeitbestimmung aus der Sicht des verwendeten Betriebsmittels. Eine etwas andere Zeitenbetrachtung würde sich aus der Sicht des Werkstückes oder Werkstoffes ergeben. Man würde dann von Verarbeitungszeit sprechen mit einer Aufteilung in



Für die Bestimmung der Durchlaufzeit spielt die Betrachtungsweise aber letztlich keine Rolle. Vgl. im einzelnen Hoss, K.: a.a.O., S. 32/33

- 2) Für die Transportzeit kann man sich mit den groben Richtwerten begnügen: z.B. Annahme von
(a) konstanter Transportzeit für jeden Maschinenübergang,
(b) prozentualen Anteil der Operationszeit.
- 3) Die Liegezeit kann als Erwartungswert je Auftrag oder Operation erfaßt werden. Mittels wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen hat Sokolizyn bewiesen, daß die mittlere Wartezeit sich mit wachsender Anzahl J der am Arbeitsplatz zu bearbeitenden Aufträge (Produkte, Lose) nach der Formel

$\bar{w} = (1 - 1/2 J) \cdot p$ mittel; p = mittlere Operationszeit
 $\bar{w}$ = Warte- oder Liegezeit
der mittleren Operationszeit asymptotisch annähert.
Zitiert nach Hoss, K.: a.a.O., S. 67: Sokolizyn, S.A.:
Primenenie Teorii Verojatnotej Dlja Opredelelenija

Fortsetzung siehe Seite 142

größen abzuschätzen. WEINBERG¹⁾ versucht etwa in seiner empirisch statistischen Studie die Durchlaufzeit als Funktion der pro Auftrag j aufzuwendenden Lohnsumme L und Losgröße x_j zu bestimmen:

$$\text{Durchlaufzeit } z_j = f(L_j, x_{1j},)$$

Dabei bildet dann die Güte der Daten der Angebotskalkulation die Voraussetzung für die Bestimmung der Durchlaufdauer.²⁾ Kann WEINBERG diese Überlegungen durch empirisch ermittelte Durchlauf- und Lohnsummenkurven bei den verschiedenen Erzeugnissen des Apparatebaus untermauern, so muß man für den Fall einer stark aufgeteilten Fertigung, bei der Übernahmeteile und Baugruppen in paralleler Fertigung erstellt werden, erhebliche Bedenken anmelden.

Auch der von RUIZ-PALÁ und AVILA³⁾ dargestellte Fall einer Durchlaufzeitbestimmung bedarf einer Anpassung an die in der Wirklichkeit vorliegenden Verhältnisse. Sie simulieren die Durchlaufzeit mittels Zufallszahlen, wobei sie den Bearbeitungszeiten eine Exponential-Verteilung und den Wartezeiten eine Erlang'sche Verteilung zugrunde legen und die wahrscheinliche Durchlaufzeit durch

3) Fortsetzung von Seite 141:

Mezoperacionnogo Vremeni (Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung zur Bestimmung der Zwischenoperationszeit). Trudy Leningradskogo Politechničeskogo Instituta imeni M.I. Kalinina Nr. 214, 1960

- 1) Vgl. Weinberg, F.: Über die Anwendung mathematischer Methoden mit spezieller Würdigung der Wahrscheinlichkeitsrechnung in der Termin-Grobplanung für differenzierte Fabrikationsprogramme bei vorwiegender Serienfertigung. Diss. Zürich 1954
- 2) Vgl. dazu auch die Ausführungen Ellingers über den Verkaufspreis als Ausgangspunkt für die Durchlaufzeitbestimmung sowie die Erörterungen über die Fertigungslohnsumme. Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 110 ff.
- 3) Vgl. Ruiz-Palá, E. - Avila, K.: Einige Anwendungen der Warteschlangentheorie auf dem Gebiet der Produktion. Die Fertigungszeiten bei der Serienproduktion. In: ZfB 1964 (34), S. 172 - 180

Addition der erhaltenen Zeiten für eine Serie oder ein Los ermitteln.

Ein von VAZSONYI¹⁾ entwickeltes Verfahren (Gozinto-Theorem)²⁾ erlaubt eine Fristenplanung mit Hilfe der Matrizenrechnung. VAZSONYI geht dabei von einer Teilebedarfsrechnung aus, die angibt, wie oft Teile bzw. Baugruppen in höheren Baugruppen oder gegebenenfalls im Endprodukt enthalten sind. Dies erfolgt durch Herleitung der sogenannten Gesamtbedarfsmatrix (total requirement factor matrix) aus der sogenannten Direktbedarfsmatrix (next assembly quantity matrix).³⁾ Die Direktbedarfsmatrix gibt an, welche Anzahl der einzelnen Zwischenprodukte i (bzw. Einzelteile) "direkt" für ein "höheres" Werkstück (Baugruppe) benötigt wird. Die Gesamtbedarfsmatrix zeigt wiederum die Anzahl der Einzelteile i , die ins Enderzeugnis eingegangen sind. Mit den vorgegebenen Auftragsmengen s ergeben sich die Bedarfsmengen x_i der Einzelteile i . Legt man dieser reinen Mengenplanung nun Durchlaufzeiten nach der vorher angegebenen Zeitenermittlung zugrunde, so läßt sich mit bestimmten Formeln⁴⁾ daraus eine terminbezogene Mengenplanung erreichen, die uns den Arbeitsbeginn, das Arbeitsende sowie den Liefertermin anzeigt. Dies ist aber nur in Verbindung mit den gegebenen oder bestimmbaren Durchlaufzeiten möglich, was entgegen anderer Meinungen⁵⁾ nochmals hervorgehoben werden muß.

1) Vgl. Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 385 - 405

2) Siehe zur Namensgebung Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 385 und 393

3) Vgl. Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 386/387

4) Vgl. Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 402 Formeln (13.67 - 13.69)

5) Vgl. dazu Pahlitzsch, G. - Berr, U.: Über mathematische Modelle zur Fertigungssteuerung in der Metallindustrie. In: Werkstattstechnik 1960 (50), 9, S. 465 - 470, insbesondere S. 469 und

Bei einer Betrachtung der Zeitplanungsprobleme sollte man keinesfalls die Überlegungen ELLINGERS¹⁾ über die optimale Vorbereitungszeit vergessen, auch wenn es sich hierbei um keine spezifisch operationsanalytische Betrachtung handelt, da die Lösung auf "Grenz"-Vorstellungen beruht. ELLINGER unterteilt die Gesamtzeit eines Arbeitsganges in Vorbereitungszeit und Bearbeitungszeit, wobei er unter Vorbereitungszeit die Zeit "für den Bau der Produktionsmittel und die Einführung des vollkommenen Fertigungsverfahrens"²⁾ versteht.

Am Beispiel der spanabhebenden Bearbeitung einer Welle auf einer Drehbank mit Vielstahleinrichtung wird ge-

5) Fortsetzung von Seite 143:

Pahlitzsch, G. - Berr, U.: Ein Verfahren zur Fertigungssteuerung in der Metallindustrie mit gekoppelten mathematischen Modellen. 1. und 2. Teil. In: Werkstattstechnik 1962 (52), 5 u. 8, S. 224 - 230, S. 401 - 406, hier S. 225/226. Die notwendige Berücksichtigung der Durchlaufzeit kommt hier nicht ganz klar zum Ausdruck. Überhaupt muß man bei der Betrachtung des Zeitproblems in der Ablaufplanung zwischen einem realtechnischen und einem organisationstechnisch-betriebswirtschaftlichen Problem unterscheiden. Beim realtechnischen Zeitproblem handelt es sich um die reine Zeitmessung des Arbeitsganges in Verbindung mit der Arbeitsganganalyse. Die ermittelte Dauer wird in organisationstechnischer Hinsicht als Datum behandelt. Diese Betrachtungsweise liegt etwa bei Gutenberg vor. (Vgl. Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., 12. Aufl., S. 219/220). Ellinger dagegen läßt bei seinen Überlegungen - wie noch zu zeigen sein wird - eine solche grundsätzliche Trennung nicht zu. Er geht mit seiner Problemformulierung, ohne die realtechnische Seite näher zu betrachten, an die optimale Aufteilung der Durchlaufzeit (Gesamtzeit) in Vorbereitungs- und Verarbeitungszeit. Seine Betrachtung der Durchlaufzeit bezieht sich dabei nur auf ein sehr beschränktes, räumliches und zeitliches Problem und wäre etwa als Unterproblem der (allgemeinen) Durchlaufzeitbestimmung zu betrachten. Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 97 - 103 - Zum Gesamtproblem vgl. auch Schweitzer, M.: Probleme der Ablauforganisation in Unternehmungen. Berlin 1964, S. 34 - 69

1) Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 97 ff.

2) Vgl. Ellinger, Th.: a.a.O., S. 98

zeigt, daß beim Einsatz von zwei Stählen gegenüber dem Einsatz von einem Stahl die Bearbeitungszeit der Welle um die Hälfte sinkt, während sich die Vorbereitungszeit verdoppelt. Sind Ausgangswerte für die Vorbereitungs- und Bearbeitungszeit vorhanden, so ist der Einsatz der Mehrstahleinrichtung solange sinnvoll - die technische Möglichkeit vorausgesetzt - als der "Grenzaufwand" an Vorbereitungszeit mindestens der Ersparnis ("Grenzertrag") an Verarbeitungszeit entspricht.¹⁾ Die optimale Vorbereitungszeit und damit auch die optimale Gesamtzeit ergibt sich bei gleichem "Grenzaufwand" an Vorbereitungszeit und "Grenzertrag" an Verarbeitungszeit.

Für die Berechnung der optimalen Vorbereitungszeit eines Betriebsmittels stellt sich eine weitere Frage, wie sie ähnlich schon einmal beim Losfolgeproblem aufgetaucht ist. Ist es aufgrund technischer Voraussetzungen möglich, durch eine bestimmte Reihenfolge von Werkstücken (Objekten) von einer vorgegebenen Vorbereitungszeit des Betriebsmittels einige Zeiteinheiten einzusparen,²⁾ so ergibt sich die Frage nach der optimalen Vorbereitungszeit in Abhängigkeit von der Reihenfolge. In dieser abgegrenzten Form ist dieses Zeit-Reihenfolge-Problem als Zuweisungsmodell (assignment problem) jederzeit formulierbar und lösbar.³⁾

1) Eine absolute Verkürzung der Gesamtdurchlaufzeit tritt nur ein, wenn mindestens gilt:

$$\frac{\text{Vorbereitungszeit}}{\text{Bearbeitungszeit}} < 1/2$$

Vgl. Schweitzer, M.: a.a.O., S. 53

2) z.B. in der Papierindustrie, aber auch beim "Ziehen" in der Glasfabrik, obwohl dort der absolute Unterschied nur gering ist.

3) Vgl. Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: a.a.O., S. 270 - 273

Für eine mehr anlagenbezogene Termingroßplanung mit den folgenden Aufgaben:^{1) 2)}

- (1) Errechnung der jeweiligen Kapazitätsauslastung,
- (2) Abstimmung zwischen Kapazitätsauslastung und Lieferterminen (Kapazitätsausgleichsrechnung)
 - (a) zwecks Überprüfung vorgegebener Liefertermine,
 - (b) Abgabe von Angebotslieferterminen,
- (3) Vorbereitung einer gleichmäßigen Abteilungs- oder Werkstättenauslastung,³⁾

haben LEVY, THOMPSON und WIEST⁴⁾ unter Anwendung von CPM ein, auf einer progressiven⁵⁾ Kapazitätsausgleichsrechnung beruhendes Beispiel gegeben. Sie beziehen sich dabei auf die Fertigung von Schiffen. Werden dabei mehrere Unteraufträge gleichzeitig in den einzelnen Werkstätten bzw. auf den Maschinengruppen bearbeitet, so wird zum Zweck einer simultanen Kapazitätsausgleichsrechnung eine Überlagerung mehrerer Netzwerke mittels des sogenannten (MS)²⁾-Verfahrens (multiship, multishop, work-loading-smoothing) vorgenommen. Es weist folgende Rechenphasen auf:⁶⁾

- (1) Unter Anwendung von CPM Berechnung frühester und spätester Start- und Endtermine sowie der Schlupfzeit für jede Aktivität und jedes Projekt.

1) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 73

2) Vgl. auch Ellinger, Th.: a.a.O., S. 125/126, der sich hierbei an Weinberg, F.: a.a.O., anlehnt.

3) Vgl. hierzu auch die Fragestellung des sogenannten "production smoothing", das innerhalb eines bestimmten Zeitraumes obige Aufgabe bei gegebener Auftragsstruktur über die Lagerbildung zu erreichen sucht.

4) Vgl. Levy, F.K. - Thompson, G.L. - Wiest, J.D.: Multiship, Multishop, Workload-Smoothing Program. In: Nav.Res.Log.Quarterly 1962 (9), S. 37 - 44

5) Eine retrograde anlagenbezogene Termingroßplanung ist bei der Werkstattfertigung nur möglich, wenn der Betrieb unterbelastet ist bzw. Überkapazitäten aufweist.

6) Vgl. Hoss, K.: a.a.O., S. 77, Fußnote

- (2) Ermittlung der zeitlichen Werkstättenbelastung pro Tag oder Woche, indem die Aktivitäten nach dem frühesten Starttermin eingeplant und je Werkstatt überlagert werden.
- (3) Durch progressives Verschieben der nichtkritischen Aktivitäten innerhalb des Schlupfes werden in den Werkstätten simultan die Belastungsspitzen unter die täglichen oder wöchentlichen Kapazitätsgrenzen abgebaut. Neuberechnung der jeweils nachfolgenden Operationen.
- (4) Können auf diese Weise die Kapazitätsgrenzen für einige Werkstätten nicht unterschritten werden, so beginnt (3) von vorne.

6. Operationsanalytische Zwischenlager- und Transportplanung

Die auch zu den Aufgaben der Fertigungsablaufplanung gehörige Planung der Zwischenlager ergibt sich implizit bei der Lösung des Zuordnungsproblems. Ein spezieller Ansatz für das Zwischenlagerproblem ist uns nicht bekannt geworden. Allerdings läßt sich natürlich die Lagerhaltungstheorie jederzeit auch auf die Zwischenlagerplanung anwenden, jedoch nur ohne besondere Berücksichtigung des Ablaufproblems.

Für die optimale Losgrößenberechnung bei mehrstufiger Fertigung bekommen wir die Zwischenlagerplanung (Stau- und Wartelager) im Verlauf der Rechnung.¹⁾

1) Vgl. Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen bei mehrstufiger Fertigung. Sonderdruck aus: ZWF 1965 (60), Heft 3, S. 113 - 118 und Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen in der Einkaufs- und Fertigungsdisposition. Teil 2: Optimale Losgrößen der Fertigung. In: ADL-Nachrichten 1966 (11), S. 10 - 33, hier S. 14 - 27, wobei auch auf die Ablaufprobleme bei mehrstufiger Mehrproduktfertigung eingegangen wird.

Die Transportplanung kann operationsanalytisch mit Hilfe des schon vielfach angeführten Transportmodells gelöst werden, wobei Halberzeugnisse

- (a) von gewissen Quellen (Maschinenausstoß)
- (b) direkt zu Weiterverarbeitungsplätzen so geschickt werden - wo verschieden große Mengen verlangt werden¹⁾ -
- (c) daß die (linearen) Transportkosten insgesamt ein Minimum ergeben.

Einzuwenden ist hierbei, daß ein solches Transportproblem beim internen Transport nur in den seltensten Fällen von der Höhe der absoluten Transportkosten her interessant sein wird. Grundsätzlich ist eine solche alternative Planung jederzeit denkbar und damit erwähnenswert.²⁾

IV. Bereitstellungsplanung

Die Bereitstellungsplanung hat die Aufgabe, die für den Vollzug des Produktionsprogrammes und des Ablaufes desselben notwendigen Betriebsmittel, Arbeitskräfte und Werkstoffe nach Art, Menge und Zeit so verfügbar zu machen, daß der Produktionsprozeß rationell gestaltet und planmäßig durchgeführt werden kann.³⁾ Die augenscheinliche Interdependenz dieser drei Faktoren (Programm, Ablauf und Bereitstellung) zeigt sich schon daran, daß ohne Programm- und Ablaufbestimmung nicht bereitgestellt und ohne rechtzeitige Bereitstellung das Programm und der Ablauf nicht vollzogen werden kann bzw. neu bestimmt werden muß. Alle drei Faktoren können also optimal nur

¹⁾ Allgemein gilt, der Gesamtausstoß entspricht der gesamten Weiterverarbeitungsmenge.

²⁾ Zu den Einzelheiten sei auf Teil I, A, III, 5 verwiesen.

³⁾ Vgl. Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., S. 172

in einem simultanen Zusammenwirken bestimmt werden. Aus Darstellungsgründen mußten wir diese drei Faktoren aber getrennt behandeln, wobei uns bei der nun folgenden Bereitstellungsplanung, wie schon bei den vorausgegangenen Fällen, nur die operationsanalytischen Anwendungsprobleme interessieren. Die angeführten Probleme sind dabei unabhängig vom Fertigungssystem.

1. Betriebsmittel

Bei der Bereitstellung der Betriebsmittel taucht immer wieder die Frage auf, ob die einzelnen Maschinen die Voraussetzungen für einen betriebsmittelbedingten störungsfreien Ablauf noch erfüllen oder ob es nicht besser gewesen wäre, sie zu ersetzen. Dieses Problem wird operationsanalytisch mit der sogenannten Ersatztheorie^{1) 2)} behandelt. Wir wollen uns auf dieses reine Ersatz-Bereitstellungsproblem beschränken, obwohl wir uns im klaren sind, daß wir damit den außerordentlich interessanten Problemkreis der mit der Ersetzung verbundenen Investition und den Auswirkungen auf das Produktionsprogramm ausschließen.

2. Arbeitskräfte

Engpässe in Form von Bedienungsschaltern mit den dazugehörigen Besetzungen und die vor den Schaltern wartenden Arbeiter können mit Hilfe eines Warteschlangenmodells³⁾ bestimmt werden.⁴⁾

-
- 1) Über die verschiedenen Möglichkeiten der Ersatzzeitpunktbestimmung vergleiche: Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., S. 175
 - 2) Zu Einzelheiten der operationsanalytischen Fragestellungen sei auf Teil 1/A/III/6 verwiesen.
 - 3) Vgl. im einzelnen Teil 1/A/III/7
 - 4) Hierzu vergleiche auch das praktische Beispiel in Teil 2/D/III/4

Dieses sehr indirekte Personalbereitstellungsproblem - durch neues Bedienungspersonal bzw. erweiterte Schalteranzahl wird die Warteschlange beseitigt - muß von dem direkten Personalplanungsproblem (personel assignment problem),¹⁾ wie es dem folgenden Sachverhalt zugrunde liegt, unterschieden werden. Das Personalplanungsproblem geht von der Annahme aus, daß jede bereitgestellte Arbeitskraft auf unterschiedliche Weise für die anfallenden Arbeiten qualifiziert ist. Durch die optimale Zuordnung der n Arbeiter auf die m Arbeiten ($n = m$) soll die Gesamtleistungsfähigkeit der Bereitstellung maximiert, oder anders ausgedrückt, gestellte Anforderungen maximal erfüllt werden.²⁾

3. Werkstoffe

Bei der Bereitstellungsplanung der Werkstoffe ergeben sich unter dem Aspekt der rein operationsanalytischen Anwendung folgende Problemformulierungen:

Eine fertigungssynchrone Bereitstellung der Werkstoffe ist gewöhnlich nur über ein Lager möglich. Die hier anfallenden Lagerhaltungsprobleme werden mit der operationsanalytischen Lagerhaltungstheorie zu lösen versucht. Mit Hinblick auf den genau bekannten "Abgang der Rohstoffe vom Lager" bei der Glasfabrikation ist eine der wesentlichsten Variablen für eine rationale Lagerpolitik bekannt, und - wie im praktischen Beispiel zu zeigen sein wird - eine operationsanalytische Anwendung unter den verschiedensten Fragestellungen denkbar.

Die Bereitstellungsplanung umschließt auch die Frage

1) Vgl. unser praktisches Beispiel: 2/E/II/2

2) Vgl. Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.:
a.a.O., S. 195 - 198

nach Art und Menge der bereitgestellten Werkstoffe. Ausgehend von einer bestimmten Menge eines vorgegebenen Endproduktes, kann das Problem der kostenminimalen Kombination der bereitgestellten Ausgangsstoffe in Form des "Mischungsproblems" auftreten. Hierbei wird nach der (Kauf-)Menge der verschiedenen Ausgangsstoffe mit jeweils bekannten Kosten und Eigenschaften gefragt, wobei die Endprodukte gewisse - auch zwischen verschiedenen oberen und unteren Grenzen liegende - Eigenschaften erfüllen und die für die Mischung notwendigen Beschaffungskosten minimiert werden sollen.¹⁾ Gerade dieses Mischungsproblem findet eine Vielzahl industrieller Anwendungsgebiete, wobei besonders die Verwendung in der chemischen Industrie mit ihren vielfältigen Verzweigungen, wie pharmazeutische, Farben-, Lack- und petrochemische Industrie, aber auch in der Kraftfutterindustrie²⁾ und der Roheisenerzeugung zu nennen ist.³⁾ Ihren Wesen nach handelt es sich bei den obengenannten Mischungsproblemen mehr um Produktionsplanungsmodelle, deren Ergebnisse aber die Bereitstellungsplanung unmittelbar betreffen. Für das Mischungsproblem der Glasfabrik könnte, in Anlehnung an die schon 1954 durchgeführten Untersuchungen über die kostenoptimale Möllierzusammensetzung bei der Roheisenerzeugung, ein ähnliches Modell gebildet werden.⁴⁾

1) Vgl. Dantzig, G.B.: a.a.O., S. 50 - 58

2) Eine ähnliche Bestimmung für den menschlichen Bereich ist mit dem von Stigler berechneten kostenminimalen, zur Existenz genügenden, Ernährungsprogramm schon vollzogen worden. Vgl. Vokuhl, P.: Möglichkeiten der Anwendung der linearen Programmierung in Industriebetrieben. Diss. Berlin 1965, S. 30/31

3) Vgl. Vokuhl, P.: a.a.O., S. 113

4) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 350 - 353 -
Vgl. aber die Ausführungen Teil 2/E/III/1

Ein weiteres Bereitstellungsproblem ergibt sich mit dem sogenannten Verschnittproblem, bei dem die Menge der bereitgestellten Werkstoffe bzw. Halberzeugnisse bestimmt werden soll, um gegebene Aufträge kosten- bzw. verschnittminimal erfüllen zu können.¹⁾ Die Lösung dieser Frage wird sich speziell bei der Glasfertigung als ein außerordentlich wichtiger Anwendungsfall herausstellen.

Im Kapitel Fertigung und Operations Research haben wir versucht, einen Gesamtüberblick über die Anwendungsmöglichkeiten operationsanalytischer Verfahren in der Fertigung zu geben. Von den hier angegebenen Modellen der verschiedenen Planungsbereiche werden wir im folgenden die am Beispiel der Glasfabrik verifizierbaren Planungssituationen in Teil 2 in Form praktischer Beispiele darstellen.

Bevor wir aber dazu übergehen, wollen wir im nächsten Unterkapitel allgemeine Anwendungskriterien und die Grenzen von Operations Research darstellen.

1) Vgl. Vokuhl, P.: a.a.O., S. 92
sowie unser praktisches Beispiel in Teil
2/E/III/2 u. 3

C) Allgemeine Anwendungskriterien und Grenzen von Operations Research

I. Allgemeine Kriterien operationsanalytischer Anwendungsmöglichkeit

Bevor wir uns den einzelnen Anwendungsmöglichkeiten in der Glasfabrik zuwenden, sollen noch einige allgemeine Kriterien - auch im Hinblick auf die Grenzen der Anwendung¹⁾ - kurz näher untersucht werden. Dabei handelt es sich um die Möglichkeit der Quantifizierung der Modellelemente, der Beziehungen zwischen den Quantitäten und der Erfassung menschlichen Verhaltens sowie verschiedener anderer bemerkenswerter Kriterien.

1. Quantifizierbarkeit der Modellelemente²⁾

Die in Operations Research verwendeten Modelle sind Mengenmodelle, d.h. ihre Elemente sind Quantitäten. Diese Elemente müssen mengenmäßig bestimmt sein, um mit ihnen rechnen zu können. Bei der Konstruktion dieser Modelle versucht man, die "Phänomene" des Betriebsprozesses, wie Auftragsmengen, Bestellmengen, Transportmittelmengen, Maschinen, Rohstoffmengen, Menschen, Arbeitsstunden, Kosten, Preise usw. festzustellen, sie zu bewerten und in das Modell einzusetzen. Diese "Phänomene", die für die Mathematiker und Statistiker in Zahlen fixiert sind, werden in der Erkenntnis ihrer Problematik auch "statistische Schatten"³⁾ genannt, da sie nur gewisse Eigen-

1) Das Problem liegt darin, eine Möglichkeit zu finden, um festzustellen, wann und wo die Anwendungsmöglichkeit aufhört und die Grenze beginnt.

2) In Anlehnung an Kulhavy, E.: Operations Research ..., a.a.O., S. 106 - 116

3) Anderson, O.: Probleme der statistischen Methodenlehre in den Sozialwissenschaften. Würzburg 1954, S. 22, 305

schaften der ihnen zugrunde liegenden, viel komplizierteren Gesamtheiten ausdrücken. In der Betriebswirtschaftslehre zeigt sich aber, daß hinter allen Maßgrößen - wie Kosten, Aufwendungen, Erträge, Kapital, Gewinne - das qualitative Substrat steht, es sich hierbei also nicht um Quantitäten, sondern um Substrate möglicher Quantität handelt. Dabei haben alle diese betriebswirtschaftlichen Größen nur einen Sinn, wenn man zugleich auch die nichtquantitative Grundbedeutung kennt.¹⁾ Hier gilt nicht, wie DESCARTES meint, daß die Quantität mit dem Gegenstand identisch sei.²⁾ Auch ENGELMANN weist auf diese Problematik hin, wenn er in einem etwas anderen Zusammenhang sagt, daß sich der Geldwert wie ein Schleier über das eigentliche Geschehen der Wirtschaft ausbreite.³⁾ Interessiert den Mathematiker und den Statistiker nur die Zahl, so sucht der "Unternehmensforscher" "kausalmechanische Aktivitätsanalysen".⁴⁾ Dabei stößt er aber auf die Schwierigkeit, die anfangs nur verbal fixierten "Phänomene" des Betriebsablaufes auch zahlenmäßig richtig zu erfassen. Bestünde diese Schwierigkeit nicht, so wäre der Schritt von der Wirtschaft zur Wirtschaftstechnik "mit all der Rechenhaftigkeit, Mathematik und Mechanik, die einer solchen technischen Gestaltung ... eigentümlich ist"⁵⁾ durch Einführung von Geldmassen (Chrematik) nicht sehr weit. Die wirtschaftlichen Massen würden - als Geldmassen physikalischen Massen formal gleichgesetzt - zu allen Rechnungen herangezogen. Dieses Endziel, das wir vielleicht

1) Vgl. Löffelholz, J.: Mathematik und Betriebswirtschaft. In: ZfB 1955 (25), S. 385 - 394, hier S. 387

2) Vgl. Löffelholz, J.: a.a.O., S. 393

3) Vgl. Engelmann, K.: Zur Frage des pagatorischen Kostenbegriffes. In: ZfB 1959 (29), S. 166 - 177, hier S. 167

4) Kulhavy, E.: a.a.O., S. 107

5) Waffenschmidt, W.G.: Technik und Wirtschaft der Gegenwart. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1952, S. 270

nie erreichen werden, erfüllt sich als Teilziel dann, wenn wir die "Phänomene" des Betriebsablaufes in ihren Merkmalen zu messen versuchen. Dabei zeigt sich, daß die Merkmale/Eigenschaften der Bezeichnung oder Messung durch Zahlen zugänglich sein können oder nicht. Bei letzterem handelt es sich um reine *Q u a l i t ä - t e n*¹⁾, auf die Zahlen nicht unmittelbar anzuwenden sind (z.B. Farben²⁾, Formen). Bei den meßbaren Merkmalen kann man ordinale und kardinale Gesichtspunkte unterscheiden. Ist ein betrachtetes Merkmal einer gewissen *Z u o r d n u n g* fähig, so werden sie Größen (Magnituden³⁾) genannt. Die Zahl, die einer *G r ö ß e* zugeordnet wird, dient dazu, ihre Lage in der zugehörigen Ordnung festzulegen (Ordinalzahl: °Celsius, Fahrenheit); dabei ist die Verbindung gewöhnlich lose und keinesfalls eindeutig. Eine zweite Unterscheidung läßt sich innerhalb der ordinalen Größen vornehmen, je nachdem, ob sich die *K a r d i n a l* bedeutung der Zahlen anwenden läßt oder nicht, und zwar zusätzlich zur ordinalen Bedeutung. Hat eine ordinale Größe additive Eigenschaften, d.h. zwei beliebige ihrer Werte können zu einem dritten zusammengezählt werden - dabei lassen sich die Arithmetikregeln anwenden - so können die Zahlen in ihrer Kardinalbedeutung benützt werden - z.B. 10 kg Fe (Eisen) + 20 kg Fe = 30 kg. Zahlen mit kardinaler Bedeutung nennt man direkt meßbare Größen (Meßgrößen, Quantitäten); sie können geordnet und in Längen-, Mengen- und Zeiteinheiten gemessen werden.⁴⁾ Die betriebswirtschaftliche Problematik der Anwendungsmöglichkeit von Operations Research liegt nun in der Quantifizierung der "Phänomene"

1) Vgl. Allen, R.G.D.: Mathematik für Volks- und Betriebswirte. Dt.: E. Kosiol, Berlin 1956, S. 10

2) Farbe ist mit Hilfe von Wellenlängen indirekt meßbar zu machen. Vgl. Allen, R.G.D.: a.a.O., S. 10

3) Allen, R.G.D.: a.a.O., S. 11

4) Vgl. Allen, R.G.D.: a.a.O., S. 11

und - was später noch auszuführen sein wird - in der Erfassung der Zusammenhänge in (mathematischen) Funktionen. Eine Quantifizierung wird vor allem dadurch erschwert, daß die wirtschaftlichen Phänomene nicht nur Eigenschaften und Merkmale aufweisen, sondern auch einen Wert besitzen. Die Quantifizierung erstreckt sich dann

- a) auf die rein quantitative Erfassung meist stofflich-technischer Mengen (reine Mengenrechnung),
- b) die "konventionelle" Bewertung etwa zum Zwecke der Bilanzierung¹⁾ und
- c) die Zuordnung von bestimmten Wertangaben zu Größen, die nicht ohne weiteres meßbar sind.²⁾

Dies kann einmal im Wege der

- aa) Direktschätzung (Goodwill wird geschätzt),
- bb) zum anderen durch eine ordinale Zuordnung von Wertangaben zu den Größen geschehen, um daraus kardinal meßbare Größen zu erhalten.

(Einführung des Begriffs der mathematischen Erwartung)

Auf dem Gebiet des Operations Research liegt die Hauptschwierigkeit bei einer Quantifizierung überhaupt und der Einführung der quantifizierten Größen in die Modellkonstruktion. Da im Modell nur die quantifizierte Größe erscheint und diese Quantifizierung oft sehr willkürlich erfolgt, besteht die Gefahr, "daß der Versuch einer solchen Zuordnung von Kardinalzahlen und Wertmerkmalen den Gültigkeitsbereich des Modells soweit einschränkt, daß seine Brauchbarkeit praktisch schwindet."³⁾ Ferner ist nach erfolgter Zuordnung genauer zu schwer quantifizierbaren Werten eine Veränderung der Bewertungsgrundlagen

1) Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 114

2) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 94

3) Ablauf- und Planungsforschung - Operations Research - RW-Auslandsdienst ..., a.a.O., S. 69

nicht leicht festzustellen, und man ist nicht selten geneigt, an einem einmal zugeordneten Wert selbst dann festzuhalten, wenn er aufgrund einer veränderten Betriebslage nicht mehr aktuell ist.¹⁾ Die Quantifizierung ordinaler Größen - falls sie keine kardinale Bedeutung haben - erfolgt durch eindimensionale, wenn auch mehrstufige Verfahren.²⁾ In Anlehnung an CHURCHMAN, ACKOFF, ARNOFF geht man dabei folgendermaßen vor:³⁾

Man reihe die zu quantifizierenden Ergebnisse nach ihrer Wichtigkeit auf.

Dann ordne man dem am höchsten bewerteten Ergebnis den Wert 1 zu und den anderen Ergebnissen entsprechende relative Werte.

Man versuche nun, in einem sukzessiven Vergleich die Schätzungen zu überprüfen. Z.B., wir erhalten 4 Ergebnisse, wie wir mit

$$\begin{aligned}O_1 &= 1 \\O_2 &= 0,8 \\O_3 &= 0,5 \\O_4 &= 0,3\end{aligned}$$

bewerten und dann im Vergleich von

O_1 verglichen mit O_2 & O_3 & O_4

O_2 verglichen mit O_3 & O_4

O_3 verglichen mit O_4 & O_1

neu abschätzen.⁴⁾

Die Ergebnisse werden nun mit den relativen Werten ge-

1) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 94

2) Das wird vor allem von Zimmermann kritisiert und durch ein zweidimensionales Verfahren, ähnlich dem, wie es in der Arbeitsbewertung verwendet wird, ersetzt.

3) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 132 - 147, besonders S. 134/135

4) Das Zeichen & ist das Zeichen der Symbolischen Logik für "und".

wichtet, und man versucht, daraus einen kardinalen Wert - in Punkten ausgedrückt - zu erhalten.

Solche quantifizierende Schätzungen sind nicht immer möglich. Besonders die organisierenden Unternehmerleistungen entziehen sich weitgehend dieser Quantifizierung und zeigen die erste Grenze der Anwendungsmöglichkeit. Man hat es "eben nicht allein mit objektiv-mechanischen, sondern zumindest ebenso mit nicht quantifizierbaren Abläufen aus dem Bereich des Irrationalen, Geistigen und Moralischen zu tun."¹⁾ Dennoch verbleibt noch eine Vielzahl von Fällen - es genügen ja oft Annäherungslösungen - bei denen eine Quantifizierung der Daten möglich ist und damit auch die Anwendung von Operations Research.

2. Das Vorliegen von Funktionen und Abhängigkeiten

Sind nun alle relevanten Größen quantifiziert, so müssen die so gewonnenen Quantitäten in Beziehung zueinander gebracht werden. Dabei sucht man nicht irgendwelche Verknüpfungen schlechthin, sondern (mathematische) Funktionen.²⁾ "Der Begriff der Funktion umschließt die Begriffe der Beziehungen zwischen den Werten zweier Veränderli-

1) Kuhnke, H.-H.: Inhalt und Grenzen einer wirtschaftswissenschaftlichen Fundierung der Unternehmensführung. In: ZfhF (NF) 1960 (12), S. 98 - 118, hier S. 110

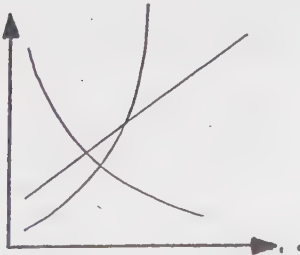
2) Der Begriff der Funktion könnte auch als Aufgabe, Tätigkeit und Obliegenheit interpretiert werden. So spricht beispielsweise der Mediziner von der Funktion der Leber, Galle ... Vgl. dazu Schmidt, K.U.: Graphisch-mathematische Methoden der Wirtschaftswissenschaften. Meisenheim am Glan 1964, S. 3
Zur betriebswirtschaftlichen Funktionalbetrachtung beachte die zusammenfassenden Überlegungen bei Becker, J.: Die unternehmerischen Entscheidungen ..., a.a.O., S. 49 - 86 sowie
Hasenack, W.: Funktionenlehre, betriebswirtschaftlich. In: HWB, 3. Aufl., Bd. 2, Sp. 2096 - 2105, besonders Sp. 2097

chen und der Abhängigkeit einer Veränderlichen von der anderen."¹⁾

Dabei lassen sich zwei Arten unterscheiden:²⁾

- a) Die determinierte, streuungslose sogenannte Gewißheitsfunktion, d.h. Größenzuordnungen und Ergebnisse stehen in einem systematischen Zusammenhang.
- b) Die indeterminierte, stochastische Wahrscheinlichkeitsfunktion, die durch eine Regressionskurve approximiert werden kann - d.h. die einzelnen Größen stehen nur in einem korrelativen Zusammenhang.³⁾ Das Wort stochastisch erklärt und kennzeichnet die zufällige Abweichung.

In der graphischen Darstellung läßt sich der Unterschied folgendermaßen demonstrieren.⁴⁾



Gewißheitsfunktionen



stochastische Wahrscheinlichkeitsfunktion

Eine Anwendung der Operations-Research-Verfahren ist also weitgehend auf das Vorhandensein von Funktionszusam-

1) Allen, R.G.D.: a.a.O., S. 29

2) Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 117

3) Schmidt, K.-U.: a.a.O., S. 12/13

4) Vgl. Schmidt, K.-U.: a.a.O., S. 12/13 und Kulhavy, E.: a.a.O., S. 121

menhängen¹⁾ abgestellt. Dabei steht ohne Zweifel fest, daß besonders in fertigungsnahen Leistungsbereichen, die stark von der Technik geprägt werden, kausale Zusammenhänge bestehen, die das Vorhandensein mathematischer Funktionen nicht ausschließen. In diesen Bereichen macht das Kostengerüst weitgehend alle Bewegungen des reinen Mengengerüsts mit; die organisierenden Unternehmerdispositionen sind nicht so stark, um die im Mengengerüst wirksamen kausalmechanischen Gesetzmäßigkeiten wesentlich zu beeinflussen.

In Anlehnung an das in der Technik gültige Gesetz von Ursache und Wirkung kann man hier gewissermaßen von "quasiursächlichen" Relationen sprechen.²⁾ Aber selbst in der Technik gilt heute - mit Ausnahme der klassischen Mechanik - die Gewißheitsfunktion nicht mehr unbestritten, denn auch in der Kernphysik ist es so, "daß die als fundamental und absolut geltenden Gesetze der Kausalität und Bestimmtheit ungenau werden und sich auflösen, wenn wir zu den letzten Einheiten und Quanten vorstoßen."³⁾

Wenn nun schon bei physikalischen Vorgängen nur stochastische Abhängigkeiten bestehen, wieviel mehr wird dies

1) Zwischen der funktionalen leistungsorientierten Betriebswirtschaftslehre und dem ebenfalls Funktionen verwendenden Operations Research besteht ein wesentlicher Unterschied. Erstere meint mit "Funktionen" sinnvolle Leistungszusammenhänge, Regelmäßigkeiten, final-zweckmäßige Beziehungen, die nicht unmittelbar mathematischer Natur sind, letztere versteht unter Funktionen nur mathematische Funktionszusammenhänge. Die von der Produktionsfaktorenlehre ausgehende "mathematische Betriebswirtschaftslehre" ist hier dem Operations Research verwandter, denn beide untersuchen nur die rein mengenmäßig ausgerichteten Beziehungen zwischen Produktionsfaktoren und Produkten. - Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 117/118; außerdem Wittmann, W.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., besonders S. 5 - 7

2) Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 119

3) Lambrecht, St.: Die Soziologie. Stuttgart 1958, S. 67

in der Wirtschaft gelten, in der "grundsätzlich nichts eindeutig determiniert ist"¹⁾ und bei der es "unmöglich ist, alle wirkenden Faktoren festzuhalten."²⁾ Die weitere Entwicklung von Operations Research innerhalb der Betriebswirtschaftslehre liegt also vor allem auf dem Gebiete der Wahrscheinlichkeitsfunktionen; so entstammen heute die meisten Anwendungsbeispiele des Operations Research dem Produktionsbereich mit seinen quasi-ursächlichen Relationen oder stellen Probleme der Betriebswissenschaft dar.

3. Das Mitwirken und Verhalten des Menschen³⁾

Bei unseren bisherigen Betrachtungen haben wir die primäre Mitwirkung des Menschen ausgeklammert und nur sekundär hat er, etwa mit seiner Bewertung, Berücksichtigung gefunden. Nun wollen wir auch den aktiv mitarbeitenden Menschen in der Unternehmung einbeziehen⁴⁾ und seine Rolle in bezug auf die Anwendbarkeit "operationsanalytischer" Methoden prüfen.

Ist die Erfassung technischer Prozesse an sich relativ unproblematisch, so ändert sich das weitgehend, sobald der Mensch aktiv innerhalb dieser Prozesse eingeschaltet wird. Natürlich gibt es hierbei auch Unterschiede bezüglich der Stellung des Menschen in der Wirtschaft, aber die Einbeziehung desselben macht das Rechnen immer problematisch, da er im wahrsten Sinne des Wortes unberechenbar ist. So kann der Mensch einmal als Verrichtungs-

1) Kulhavy, E.: a.a.O., S. 120

2) Beck, M.: Besondere Merkmale der kausalen Folge in der Betriebswirtschaftslehre. In: ZfB 1957 (27), S. 401 - 411, hier S. 411

3) Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 197 - 202

4) Vgl. Hasenack, W.: Mensch im Betrieb. Inwieweit kann oder muß die Betriebswirtschaftslehre den Menschen in ihre Untersuchungen einbeziehen. In: ZfB 1961 (31), S. 577 - 596, besonders S. 580 - 582

träger, als Funktionsträger i n n e r h a l b der Unternehmung auftreten, mit der Erbringung objektbezogener Arbeitsleistungen, dispositiver Arbeitsleistungen¹⁾ und zum anderen a u ß e r h a l b der Unternehmung als Kunde, Lieferant und Konkurrent.

a) Exekutiv-repetitive Tätigkeit

Am leichtesten läßt sich das menschliche Handeln noch erfassen, wenn es sich objektbezogen dem Wirken einer Maschine anpassen muß. Die menschliche Handlung besteht hier nur in einer ausführenden Tätigkeit, etwa innerhalb eines Fertigungsbandes, wobei der Mensch selbst zu einem Glied des Betriebsmechanismus wird. Dabei handelt es sich außerdem gewöhnlich um eine sich dauernd wiederholende (repetitive) Tätigkeit - ein Merkmal, das POCOCK²⁾ fordert, um operationsanalytische Methoden zur Anwendung bringen zu können. Die exekutiv-repetitive Tätigkeit des "entmenslichten" Menschen ist aufgrund ihrer Objektbezogenheit einer quantifizierenden Messung zugänglich, und damit kann hier Operations Research zur Anwendung kommen.³⁾

1) Vgl. Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Bd. 1, 7. Aufl., Berlin - Göttingen - Heidelberg 1962, S. 6

2) Vgl. Pocock, J.W.: Management Consulting and Operations Research. In: Operations Research for Management. Vol. 1. Hrsg.: Mc Closkey, J.F. - Trefethen, F.N. Baltimore 1954, S. 80 - 96, hier S. 95

3) Nordsieck, F.: Betriebsorganisation - Lehre und Technik, Bd. 1, S. 119
"Der Mensch ist stets ein veränderliches, in seiner Reaktion nicht vorherbestimmbares "Objekt". Dennoch will es oft gelingen, seine Verhaltensweisen zu typisieren und seine Behandlung und Bedienung damit zum Gegenstand variabler organisatorischer Regelung zu machen."

b) Schöpferische Tätigkeit

Der Mensch leistet aber nicht nur objektbezogene, sondern auch dispositive, d.h. weisungsberechtigte Arbeit. Letztere wurzelt in den drei Schichten - der irrationalen, der rationalen und der gestaltend vollziehenden.¹⁾ Sie ist eine schöpferisch-organisierende Tätigkeit, die sich sowohl innerhalb, als auch außerhalb der Unternehmung der quantitativen Erfassung entzieht. Bei dieser Art der Tätigkeit liegt in der Anwendungsmöglichkeit auch schon die Grenze derselben.

4. Weitere Kriterien

a) Umfang des Problems²⁾

Bisher muß sich Operations Research immer noch mit Sub-optima begnügen, obwohl das angestrebte Ziel die Erstellung eines Gesamtoptimums ist. Wie dies bisher an der Komplexität der Verhältnisse gescheitert ist, so kann man auch in einer weiteren Abstufung sagen, daß mit zunehmendem Volumen der Probleme Operations Research-Verfahren immer weniger anwendbar sind. Dies zeigt sich ohne weiteres darin, daß ein Detailproblem der Lagerhaltung zweifellos einfacher zu lösen ist, als etwa ein weitgefaßtes Problem der Investitionspolitik.

b) Art der Daten

"Bei einer Unterscheidung in Betriebsdaten und Marktdaten sind die Betriebsdaten im allgemeinen leichter und exakter zu gewinnen als die Marktdaten, insbesondere

1) Vgl. Schönplug, F.: Betriebswirtschaftslehre, Methoden und Hauptströmungen. 2. erw. Aufl., Hrsg.: H. Seischab, Stuttgart 1954, S. 419

2) Vgl. Kulhavy, E.: a.a.O., S. 196/197

dann, wenn sie aufgrund von Entscheidungen der Unternehmungsinstanzen beeinflusst werden können."¹⁾ Ähnlich urteilt WITTMANN, wenn er sagt, daß die Größen des Außenbereichs der Erstellung zuverlässiger Prognosen schwieriger zugänglich sind, als jene des Innenbereichs.²⁾ Außerdem ist der Grad der Ungewißheit zukünftiger Entwicklungen bei Betriebsdaten kleiner, da hier weitgehend die Beeinflussung außenstehender Personen ausgeschaltet werden kann.

c) Grad der Verwirklichung des Massenprinzips³⁾

Die einheitliche und gleichbleibende Massenfertigung ist gegenüber dem anderen Extrem, der Einzelfertigung, operationsanalytischen Methoden relativ eher zugänglich. Bei immer gleichen Produkten ist der Fertigungsablauf festgelegt. Schöpferische Leistungen treten weit hinter den sich immer wiederholenden exekutiven Leistungen zurück. Das Prinzip der "repetition of action" ist hier ebenso erfüllt wie etwa bei der Sortenfertigung und der Großserie. Bei der Kleinserie ist der Umfang der Produktion entscheidend, während bei der Individualfertigung wegen Fehlens des "repetition of action" und des Vorherrschens schöpferischer Tätigkeit Operations Research nur beschränkt anwendbar ist.

II. Allgemeine Grenzen des Operations Research

Nachdem wir im letzten Kapitel allgemeine Anwendungskriterien des Operations Research betrachtet haben, wollen

-
- 1) Grochla, E.: Das Problem der optimalen Unternehmensplanung. In: Gegenwartsfragen der Unternehmung - Offene Fragen der Betriebswirtschaft. Hrsg.: Bellinger, B., Wiesbaden 1961, S. 69
 - 2) Vgl. Wittmann, W.: Unternehmung und unvollkommene Information. Köln - Opladen 1959, S. 144
 - 3) Vgl. Kulhavy, E.: Operations Research ..., a.a.O., S. 203/204

wir nun auch die Grenzen näher untersuchen. Dabei sehen wir uns zwei Schwierigkeiten gegenüber; einmal der formalen Schwierigkeit, uns vor Wiederholungen zu hüten, da etwa die Kriterien der Anwendungsmöglichkeit schon die Grenzen mit umfassen und zum anderen die Grenzen überhaupt darstellen zu können. Letzteres ergibt sich daraus, daß es sich bei der Formulierung und Lösung eines Problems mit Hilfe des Operations Research um ein empirisches Modell handelt, d.h. die Grenzen zeigen sich erst, wenn alle betrieblichen Fragestellungen empirisch daraufhin untersucht worden sind, ob eine Modellkonstruktion möglich ist. Da solche empirischen Untersuchungen nur am Einzelfall möglich sind, fehlt eine konkrete Grenze, und wir müssen uns auf die Beschreibung allgemein möglicher Grenzen beschränken.

1. Abgrenzung

Bei der Beschreibung allgemein möglicher Grenzen wollen wir solche, die sich für einzelne Unternehmen aufgrund besonderer Umstände ergeben, von vornherein ausschalten. So etwa die Begrenzung, die darin liegt, daß ein Unternehmen durch die beschränkte Kapazität seiner Rechenanlage oder das Fehlen einer solchen überhaupt; sowie fehlende Erfahrungen des Bedienungspersonals in der Anwendung von Operations Research gehindert ist. Oder, daß ein Unternehmen aufgrund von Lieferverträgen oder sonstigen absatzpolitischen Gegebenheiten nicht in der Lage ist, das Produktionsprogramm unter Verwendung von Operations Research gewinn günstiger zu gestalten.¹⁾

1) Vgl. Vokuhl, P.: a.a.O., S. 156/157

2. Ungenügende Übereinstimmung der Modelle mit der Wirklichkeit¹⁾

Wie wir sehen konnten, besteht die Methodik des Operations Research in der Modellbildung und Modelllösung unter Verwendung logischer, statistischer und mathematischer Methoden. Bei einer Kritik müssen wir dabei zwischen den wertneutralen Axiomen der Mathematik an sich und der Zweckmäßigkeit der Anwendung innerhalb unseres Fachgebietes unterscheiden. Über die wertneutrale Mathematik wollen und können wir nichts aussagen, wohl aber über die Zweckmäßigkeit derselben innerhalb der Wirtschaftswissenschaften. Das Problem betrifft nicht die Frage, ob die mathematische Methode in der Betriebswirtschaftslehre zur Feststellung gewisser quantitativ erfaßbarer Vorgänge und Zusammenhänge überhaupt zulässig oder zweckmäßig ist - daß sie es ist, darüber herrscht kein Zweifel - sondern nur darum, wo die Grenzen der mathematischen Methode, und damit auch des Operations Research, in der Betriebswirtschaftslehre liegen.^{2) 3)}

GOETHE schon pries "die Mathematik als die erhabenste und nützlichste Wissenschaft, solange man sie da anwendet, wo sie am Platze ist."⁴⁾ Für ihre Anwendung innerhalb der Betriebswirtschaftslehre können wir uns LÖFFELHOLZ anschließen, "daß der mathematisch erfaßbare Teil

-
- 1) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 54
Ähnlich urteilt Böhm, H.-H.: a.a.O., S. 122: "Wie in allen Erfahrungswissenschaften sind die Analysen und Modelle stets unvollständig."
 - 2) Vgl. Löffelholz, J.: Mathematik und Betriebswirtschaft. In: ZfB 1955, S. 385 - 394, hier S. 385
 - 3) Vgl. dazu auch die Ausführungen von Tinbergen, J.: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung mathematischer Verfahren in der Wirtschaftswissenschaft. In: Z.f.d.ges. Staatswissenschaft 1949 (105), S. 638 - 652
 - 4) Schriften zur Naturwissenschaft, Propyläen-Ausgabe S. 90. Zitiert nach Löffelholz, J.: a.a.O., S. 392

der Betriebswirtschaft nur einen Ausschnitt bringt, einen kleinen Ausschnitt, wohingegen die oberen Schichten des Betriebes, ..., unmittelbar überhaupt nicht berührt werden, denn sie haben keine mathematische Struktur;"¹⁾²⁾ im besonderen meinen wir allerdings, daß der Ausschnitt, mit "einem kleinen Ausschnitt" unterbewertet ist.³⁾

Speziell bei der Modellbildung des Operations Research findet nun diese Problematik der Mathematisierung - besonders im Problem der Quantifizierung und der Bildung von Funktionen - seinen Ausdruck und soll im folgenden kurz untersucht werden.

a) Mangelnde Quantifizierbarkeit relevanter Einflußgrößen

Das Problem der Quantifizierbarkeit und das damit verbundene Problem der Bildung von Funktionen der wirtschaftlichen Daten haben wir bereits in Kapitel C/I/1 und 2 weitgehend aufgeführt. Dort sind auch schon die Grenzen angeklungen, die sich für die Anwendungsmöglich-

1) Löffelholz, J.: Mathematik ..., a.a.O., S. 394

2) Ähnlich Wöhe, G.: Methodologische Grundprobleme der Betriebswirtschaftslehre. Meisenheim am Glan 1959, S. 96: "Der Betrieb ist nicht nur eine Kombination von Produktionsverfahren, die sich rein quantitativ vollzieht, sie stellt nicht nur einen Komplex von Quantitäten dar, sondern viele, vielleicht sogar der überwiegende Teil ihrer Probleme, Zusammenhänge und Erscheinungen sind qualitativer Art."
Ebenso Schneider, E.: Sinn und Grenzen der Wirtschaftsordnung. In: Z.f.d.ges. Staatswissenschaft. 1952 (108), S. 594 - 610, hier S. 609: "... und die Grenze quantitativer Arbeitsmethoden in der Wirtschaftswissenschaft liegt dort, wo Probleme angefaßt werden, die eben keine quantitativen Aspekte aufweisen."

3) Vgl. dazu auch Böhm, H.-H.: Mathematik und Betriebswirtschaft - Einige Bemerkungen zu dem gleichnamigen Aufsatz von Dr. Löffelholz. In: ZfB 1955, S. 562 - 568

keiten ergeben. So können wir uns in diesem Abschnitt darauf beschränken, vom Negativen her den Komplex zu betrachten. Dabei müssen wir feststellen, daß es keinesfalls angeht, wenn die Unternehmensforscher oftmals aus der Not eine Tugend machen und nur diejenigen Größen verwenden, die quantifizierbar sind und auf die nicht oder nur schwer quantifizierbaren Größen verzichten und sie lediglich unquantifiziert und explizit bei einer Entscheidungsvorbereitung berücksichtigen.¹⁾ "Die Zahl und die sich anschließende Rechnung ist im allgemeinen für sie interessanter, als die vor der Zahl liegenden betriebswirtschaftlichen Gegebenheiten."²⁾ Es ist zu fordern, daß fehlende relevante Größen oder nur annähernd bestimmte Größen "ausdrücklich genannt werden, um eine Überschätzung der vorgeschlagenen Lösung in bezug auf Genauigkeit durch den Entscheidungsträger zu vermeiden."³⁾ Die Grenze kann hier nur durch die Erforschung "scheinbar nicht quantifizierbarer"⁴⁾ und sogar der "nicht quantifizierbaren"⁵⁾ Größen durch "direkte oder statistische, durch eine ordinale oder kardinale Messung"⁵⁾ verschoben werden.

Auch bei der Frage der mathematischen Funktionen⁶⁾ können wir uns mit der Feststellung begnügen, daß es keinesfalls angeht, wenn vom Verfahrensforscher Funktionen als Datum gesetzt werden, die für den Betriebswirtschaftler als problematisch oder als überhaupt nicht erwiesen

1) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 54

2) Kulhavy, E.: a.a.O., S. 116

3) Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 54

4) Schwarz, W.: Zur Bedeutung und Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Faktoren im Rahmen des investitionspolitischen Entscheidungsprozesses. In: BFuP 1960 (12), S. 686 - 696, hier S. 690

5) Angermann, A.: Entscheidungsmodelle ..., a.a.O., S. 12

6) Vgl. dazu Kapitel C/I/2

gelten.¹⁾ "Die Probleme der betriebswirtschaftlichen Theorie beginnen dort, wo die Verfahrensforscher gegenwärtig aufzuhören pflegen, wo also das komplexe System betrieblicher Zusammenhänge beginnt, wo es z.B. darum geht, "typische" Kosten- und Ertragsverläufe für diese oder jene Situation herauszuarbeiten."²⁾ Diese Beschränkung kann sich nur mit dem "Stand der betriebswirtschaftlichen Theorie"³⁾ erweitern.

b) Die Vernachlässigung vorhandener Abhängigkeiten⁴⁾

Ist gerade kritisiert worden, daß die Verfahrensforscher Funktionen setzen, wo es gar keine gibt, so kommt es auch vor, daß mit Hilfe der sogenannten Monte-Carlo-Methode oder auf anderen Wegen Zufallsverläufe ermittelt werden, wo unter Umständen Abhängigkeiten bestehen. Dies führt natürlich mit großer Wahrscheinlichkeit zu eben-
solch falschen Ergebnissen, wie die Annahme von funktionalen Zusammenhängen dort, wo keine vorhanden sind.

c) Die Interdependenz der Teilbereiche

Im Zusammenhang mit den Abhängigkeiten der Größen tritt auch die Frage der Interdependenz der Teilbereiche innerhalb der Unternehmung auf. Inwieweit ist es überhaupt möglich, ein Teilproblem aus dem Gesamtkomplex zu isolieren? Bisher ist die Lösung eines Gesamtmodells einer Unternehmung noch nicht möglich gewesen, und man hat sich gezwungenermaßen auf die Lösung von Teilproblemen

1) Vgl. Moxter, A.: Grenzen der Verfahrensforschung (Operations Research) im betriebswirtschaftlichen Bereich. In: Der Österreichische Betriebswirt 1963 (13), S. 181 - 205, hier S. 195

2) Moxter, A.: a.a.O., S. 195

3) Moxter, A.: a.a.O., S. 193

4) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 55

beschränkt. Es ist nun zu fragen, ob bei deren Lösung nicht unzulässige Vereinfachungen angenommen werden, indem man von der Teilbarkeit der TOTALprobleme in Teilprobleme ausgeht und die Interdependenz aller betrieblichen Teile vernachlässigt. KULHAVY¹⁾ führt dazu aus:

Ist ein Problem

1. eng begrenzt²⁾ und stammt es

2. aus der Fertigungswirtschaft oder aus einem fertigungsnahen Leistungsbereich,

dann kann selbst in Fällen, in denen andere Leistungen auf dieses in Frage stehende Problem (z.B. Lagerdetailproblem) unmittelbar einwirken, die Operationsforschung erfolgreich einsetzen, und zwar deshalb, weil wegen der Enge des Problems die Fernwirkungen anderer Leistungen so schwach werden, daß die rechenhafte Lösung noch brauchbar bleibt. In einem solchen Falle wird das Teiloptimum nicht im Gegensatz zum Gesamtoptimum der Unternehmung stehen." Demgegenüber zeigt sich in der betrieblichen Wirklichkeit nicht selten, daß "Kostenminimierung bei der einen Abteilung bekanntlich oft zur Kostenüberwälzung auf andere, für die betreffende Aufgabe weniger gut gerüstete Abteilungen und damit zu höheren Gesamtkosten des Betriebes führt."³⁾

d) Linearitätsbedingung der "Zielfunktion" und der Nebenbedingungen - vollständige Teilbarkeit der Faktoren

Da es für nichtlineare Modelle noch an allgemein gültigen Lösungsmethoden fehlt, herrscht gewöhnlich bei der

1) Kulhavy, E.: Operations Research ..., a.a.O., S. 197

2) Vgl. Krelle, W.: Überblick über die Problemgruppen der Unternehmensforschung und den Stand der Anwendung. In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 335 - 353, hier S. 335 - für Krelle ist dabei ein bestimmtes *be-grenztes* Problem Voraussetzung für die Anwendung.

3) Moxter, A.: Grenzen ..., a.a.O., S. 197

Modellbildung noch die Forderung nach Linearität von Zielfunktion und Nebenbedingungen. Dies wird als eine starke Einengung der Modellbildung empfunden, da es höchst selten der betrieblichen Wirklichkeit entspricht. Dadurch wird z.B. unterstellt, "daß es neben den zurechenbaren Einzelkosten proportionalen Charakters nur noch fixe Kosten gibt, so daß mengenabhängige Kosten als Funktion zweiten oder höheren Grades und insbesondere Kostenprogressionen durch wirtschaftliche Überbeanspruchung von Kapazitäten unbeachtet bleiben."¹⁾

Auch die Forderung der vollständigen Teilbarkeit der Faktoren und Prozesse ist vielfach nicht erfüllbar; so etwa bei Großprodukten wie Schiffsbauten und Brücken einerseits und bestimmten Gebäudekonstruktionen und Hochöfen andererseits.²⁾

e) Die Annahme der Konstanz der Inputdaten

Die gewöhnlich geforderte Konstanz der Inputdaten und das damit fixierte Modell entspricht nicht immer den wirtschaftlichen Gegebenheiten. Wohl existiert mit dem sogenannten parametrischen Programmieren eine Lösungsmethode, die eine Ausnahme von der Konstanz der Inputdaten zuläßt, doch führt die Lösung von verschiedenen Parameterabweichungen zu einem starken Anwachsen des Rechenaufwands, so daß auch hier wieder eine Grenze der Durchführbarkeit auftaucht. Die Konstanz der Parameter fixiert mit den restriktiven Gleichungen bzw. Ungleichungen einen "unüberschreitbaren Entscheidungsrah-

1) Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 330

2) Vgl. Lassmann, G.: Die Produktionsfunktion und ihre Bedeutung für die betriebswirtschaftliche Kosten-theorie. Köln - Opladen 1958, S. 187. Vgl. auch Wittmann, W.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 15

men"¹⁾, der z.B. den "Fall einer Unterausnützung des produktiven Apparats mit den dann auftretenden Ertragsverlusten durch Effizienzverluste in der Technologie"²⁾ nicht mit einschließt.

Die Frage ist also in der Tat berechtigt, ob nicht der wirtschaftlichen Relevanz des Operations Research Schranken gesetzt sind, die sich aus der Antinomie zwischen den statischen Voraussetzungen und dem dynamischen Wirtschaftsablauf ergeben. Als Resultat läßt sich vielleicht sagen, daß die Dauer der wirtschaftlichen Gültigkeit oder Richtigkeit der Ergebnisse des Operations Research grundsätzlich umgekehrt proportional der Veränderungshäufigkeit der zugrunde liegenden Daten ist.³⁾

f) Die Vernachlässigung reaktiver Entscheidungen^{4) 5)}

Bis jetzt ist es trotz der Konzeption der Spieltheorie nicht möglich, bei der Wahl der Parameter Entscheidungen, die von unseren Konkurrenten, Abnehmern oder Kunden getroffen werden, zu berücksichtigen. Dabei fragt man sich, ob das Verhalten der Menschen als Konkurrenten, Kunden usw. überhaupt vorausschauend erfaßbar ist. Der englische Nationalökonom SHACKLE (Liverpool) vertritt dazu die Ansicht, "daß ein Mensch, dessen Handeln vorzusehen ist, wenig menschlich ist, während die Voraussage menschlichen Handelns mehr als menschliche Kräfte

1) Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 332

2) Wittmann, W.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 11

3) Vgl. Vokuhl, P.: a.a.O., S. 158/159

4) Vgl. Zimmermann, H.: a.a.O., S. 55

5) Vgl. Teil 1/C/I/3

te erfordert."¹⁾ Demgegenüber sieht KOSIOL²⁾ in der Heranziehung spieltheoretischer Modelle eine Möglichkeit, reaktive Entscheidungen zu berücksichtigen, wobei er aber unseres Erachtens vergißt, daß wohl das Verhalten eines "rational" handelnden, optimistischen oder pessimistischen, sozusagen isolierten Menschen theoretisch zu erfassen ist, nicht immer aber die irrationalen Momente, die beim menschlichen Handeln doch letztlich oft entscheidend sind. Unseres Erachtens wäre weiter ein Unterschied zu machen zwischen Modellkonstruktionen, die das Verhalten des Menschen beim Kauf von persönlichem und von unpersönlichem Bedarf erfassen sollen, denn "werden Waren für den persönlichen Bedarf des Käufers eingekauft, so ist mit weit geringerem ökonomisch-rationalen Verhalten zu rechnen, als beim Einkauf von Gegenständen des unpersönlichen Bedarfs ..." ³⁾.

g) Die Schwierigkeit der Bestimmung der "Zielfunktion"

Eng mit der oben kurz angeschnittenen Frage des menschlich rationalen Verhaltens ist auch das Problem verbunden, ob der Mensch überhaupt in der Lage ist, die für die jeweilige Situation richtige "Zielfunktion" zu wählen. Dabei muß man unterscheiden, ob sich die "Zielfunktionen" auf einwertige oder mehrwertige ⁴⁾ Erwartungen stützen können. Die Aufstellung "objektiver" Zielgrößen bei einwertigen, d.h. Risikoerwartungen bereitet zwar erhebliche Schwierigkeiten, ist aber "grundsätzlich lösbar, wenn das auch wiederum oft ganz erhebliche Opfer

1) Ischboldin, B.: Zur Kritik der mathematischen Methode in den Wirtschaftswissenschaften. In: Zfhf (NF) 1960 (12), S. 209 - 224, dt. Stemmler, J. hier S. 218

2) Vgl. Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 333

3) Schäfer, E.: Grundlagen der Marktforschung. Köln - Opladen 1953, S. 140

4) Siehe Seite 175 Fußnote 1

hinsichtlich der Exaktheit der benutzten Modelle erfordert."¹⁾ Die Wahl der "Zielfunktion" sollte dabei immer von einem Wirtschaftler vorgenommen werden, der über eine fundierte wirtschaftliche Bildung und eine gute Übersicht über die wirtschaftlichen Zusammenhänge verfügt.²⁾ Bei der Festlegung der Zielgrößen muß man dann allerdings feststellen, daß bei Entscheidungen der Unternehmensspitze - wie Grundsatzfragen der Betriebspolitik - die in den niederen Stufen der Betriebshierarchie relativ eindeutigen Ziele "verfließen". Gibt es in den niederen Bereichen, den Arbeitsgruppen, Werkstätten usw. klare Zielsetzungen, wie Minimierung der Kosten, Maximierung der Umsätze oder minimale Durchlaufzeiten usw., so finden sich an der Spitze nicht nur überhaupt mehrdimensionale "Zielfunktionen"³⁾, sondern sogar ausgeprägte Zielkonflikte:⁴⁾ "Man erstrebt eine Vergrößerung des Marktanteils und eine maximale Rendite auf das Eigenkapital und nimmt Rücksicht auf Prestigeerwägungen der verschiedensten Art usw."⁵⁾ So darf man keinesfalls überrascht sein, daß es selbst in der Literatur zur Verwendung falscher Zielfunktionen kommt.⁶⁾

1) Moxter, A.: Grenzen der ..., a.a.O., S. 198

2) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 56

3) Vgl. White, M.C.: Multiple Goals in the Theory of the Firm, S. 181 - 216. In: Linear Programming and the Theory of Firm. Hrsg.: Boulding, K.E. - Spivey, A.W. New York 1961 (Second Printing). White schreibt: (S. 181) "... that the universally accepted goal of profit maximization is in reality a heterogeneous collection of multiple goals of firms used either in place of profit maximization or in some weighted combination with it."

4) Vgl. Moxter, A.: Grenzen ..., a.a.O., S. 197

5) Moxter, A.: Grenzen ..., a.a.O., S. 197

6) Vgl. Zimmermann, H.-J.: a.a.O., S. 56/57; Pfanzagl, J.: Minimierung sinnloser Größen. In: Ufo 1960, S. 149 - 155

h) Unsicherheit der Erwartung¹⁾

Ist bei unsicheren Erwartungen, die sich mathematisch auf einwertige Größen reduzieren lassen (Risikoerwartungen²⁾) eine Rechnung noch möglich, so haben wir bei Grö-

-
- 1) Der Begriff "Erwartung" schließt an und für sich die Unsicherheit mit ein, so daß es sich hier um eine Tautologie handeln könnte. Durch die Unterscheidung zwischen eindeutigen, meßbaren Erwartungen - die zu sicheren Erkenntnissen werden - und mehrwertigen unsicheren Erwartungen erscheint der Ausdruck "Unsicherheit der Erwartung" aber gerechtfertigt. Ganz allgemein kann man dabei Erwartungen als gegenwärtige Vorstellungen über wirtschaftliche Verhältnisse in der Zukunft auffassen - (ökonomische Erwartung). Bei dem Erwartungsprozeß handelt es sich "um die geistige Vorwegnahme eines zukünftigen Ereignisses, mit dem das Individuum sich auseinanderzusetzen gewillt ist. Dies geschieht einmal dadurch, daß sich das Individuum diese zukünftige Situation vorstellt und zum zweiten auf die Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens hin überprüft." Seidenfus, H.St.: Zur Theorie der Erwartungen. In: J.M. Keynes als Psychologe. Hrsg.: Schmolders, G. - Schröder, R. - Seidenfus, H.St. Berlin 1956, S. 97 - 134, hier S. 126
Vgl. dazu Shackle, G.L.S.: Expectation in Economics. 2d ed., Cambridge 1952, S. 1: "By expectation I mean the act of creating imaginary situations of associating them with named future dates, and of assigning to each of the hypotheses thus formed a place on a scale measuring course of action on our own part will make this hypothesis come true."
- 2) Vgl. Kosiol, E.: Modellanalyse ..., a.a.O., S. 333. Auf diesem Gebiet herrscht noch ein rechter Begriffswirrwarr. Ein Versuch, die verschiedenen Meinungen wenigstens einmal formal zu erfassen, findet sich bei Wittmann, W.: Unternehmung und unvollkommene Information, Köln - Opladen 1959, S. 33 ff. Dabei zeigt sich, daß gerade diametral entgegengesetzte Wortfassungen verwandt werden, wie z.B. die Wortprägungen von Kalveram und Oberparleiter für Wagnis und Risiko. So existieren für "Risiko" allein drei verschiedene Auffassungen. Risiko kann als
- Verlustgefahr
 - meßbare Ungewißheit (Knight)
 - die Möglichkeit eines Auseinanderklaffens von Wirtschaftsplan und effektiven Ereignissen (Eucken)
- definiert werden.
In unserem Falle haben wir uns an Knight angelehnt - vgl. Knight, F.H.: Risk, Uncertainty and Profit. 8. Aufl., New York 1957, S. 233 -, wenn wir zwischen

Fortsetzung siehe Seite 176

Ben, die auf mehrwertigen Erwartungen beruhen, andere Verhältnisse.¹⁾ Erwartungen können dabei wegen der na-

- 2) Fortsetzung von Seite 175:
einwertigen meßbaren Erwartungen - sogenannten Risikoerwartungen - und der "true uncertainty" - die wir mehrwertige Erwartung nennen - unterschieden haben.
- 1) Das Problem der Unsicherheit enthält neben dem reinen Sachproblem auch noch einige terminologische Schwierigkeiten. Das Sachproblem beruht dabei auf der Tatsache, daß erwartete Ergebnisse nur ungenau prognostiziert werden können (Prognoseunsicherheit), und daß für alternative Zielsetzungen (Aktionskurse) jeweils mehrere unterschiedliche Ergebnisse erwartet werden (Mehrwertigkeit der Erwartung). Die meisten Autoren über die Ungewißheitstheorie basieren auf den von Knight geprägten begrifflichen Unterscheidungen von "risk" und "uncertainty". Diese beziehen sich auf die Meßbarkeit der Unsicherheit, wobei man für "risk" die rechnerisch erfaßbare Unsicherheit und für "true uncertainty" die nicht mehr mit Mitteln der Wahrscheinlichkeitsrechnung erfaßbare Unsicherheit setzt. Vgl. hierzu Agthe, K.: Das Problem der unsicheren Erwartungen bei unternehmerischen Planungen und Entscheidungen. In: Unternehmensplanung. Hrsg.: Agthe, K. - Schnauffer, E. Baden-Baden 1963, S. 23 - 120, hier S. 92 - 100.
- Hart, A.G.: Anticipation, Uncertainty and Dynamic Planning. New York 1951, S. 51, erklärt den Unterschied zwischen "risk" und "uncertainty" folgendermaßen: "Estimates about any future event which is not regarded as certain may involve either uncertainty or risk. The event viewed in isolation is always uncertain. But viewed as a member of a group of events so related that their joint outcome is more certain than the individual events in the group, it is a risk. Both to a fire insurance company and to its owner the future of a building (whether it will burn up or not) is uncertain. But to the company which insures it, assuming that it also insures many comparable buildings, the burning of the building is a risk." Unter Einbeziehung des Begriffes Erwartungen bezeichnet man "risk"-Unsicherheiten auch als Risikoerwartungen oder "einwertige" Erwartungen; ihnen wird durch die Möglichkeit der Berechenbarkeit als objektive Häufigkeitsziffer der Unsicherheitscharakter weitgehend genommen. Vgl. Albach, H.: Wirtschaftlichkeitsrechnung bei unsicheren Erwartungen. Köln - Opladen 1959, S. 3
- Bei den mehrwertigen Erwartungen (true uncertainty) - alternative zukünftige Ereignisse mit einer Bandbreite von Werten (siehe weiter unten im Text) - unter-

Fortsetzung siehe Seite 177

türlichen Grenze der Informationsgewinnung - "im Hinblick auf die Zukunft kann Wissen nicht mehr ermittelt, sondern muß durch Weiterverarbeitung bereits vorhandenen Wissens gewonnen werden"¹⁾ - nur durch Urteile "über eine zukünftige Situation oder eine bevorstehende Entwicklung, denen eine mehr oder minder große Überzeugungskraft zukommt"²⁾ erfaßt werden. "Es handelt sich bei diesen Urteilen um Voraussetzungen, durch zukunftsgerichtete Überlegungen vorgenommene Festlegungen von Größen, Vorstellungen dessen, was man annimmt oder glaubt annehmen zu können, daß es eintreffen wird."³⁾ Mehrdeutige Erwartungen bilden dabei die Weiterführung der eindeutigen bzw. einwertigen Erwartungen mit dem Merkmal berechenbarer Voraussicht.⁴⁾ Erstere sind - da durch Extrapolation, Deduktion, Induktion oder Analogieschluß

1) Fortsetzung von Seite 176:
scheidet man noch zwischen subjektiv und objektiv unsicheren Erwartungen. Von subjektiv unsicheren Erwartungen sprechen wir, wenn der Unternehmer aufgrund seiner Information bzw. Erfahrung in der Lage ist, verschiedene zukünftige Ereignisse mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten zu bewerten. Objektiv unsichere Erwartungen liegen dagegen dann vor, wenn der Unternehmer die möglichen Werte zukünftiger Ereignisse angesichts seines "Wissens" über die Zukunft als gleichwertig ansehen muß und auch seine Erfahrung keine Anhaltspunkte für die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Werte gibt. Vgl. Albach, H.: Wirtschaftlichkeitsrechnung ..., a.a.O., S. 4 und Becker, J.: Die unternehmerischen Entscheidungen, a.a.O., S. 159 - 164

- 1) Wacker, J.: Entwicklung und Bestimmungsgründe unternehmerischer Entscheidung. Diss. München 1963, S. 87
- 2) Wittmann, W.: Unternehmung ..., a.a.O., S. 32
- 3) Wittmann, W.: Unternehmung ..., a.a.O., S. 32
- 4) Vgl. Koch, H.: Zur Diskussion in der Ungewißheitstheorie. In: ZfhF (NF) 1960 (12), S. 49 - 75, hier S. 53, Fußnote

gewonnen¹⁾ - in zwei Punkten unvollkommen. "Einmal ist der Disponent nicht in der Lage, eine eindeutige Aussage über die Zukunft zu machen, wie es ihm in dem gedachten Fall der vollkommenen Voraussicht möglich wäre. Er ist lediglich imstande, unter allen überhaupt denkbaren, d.h. a priori möglichen zukünftigen Datenkonstellationen, mehrere verschiedene Situationen auszumachen, deren alternativer Eintritt ihm als so glaubhaft erscheint, daß er sein Handeln darauf abstellen kann. An die Stelle des sicheren Vorauswissens einer bestimmten Datenkonstellation tritt also, wie man sagen kann, eine Voraus-schätzung, deren Ergebnis das Fürwahrscheinlichhalten mehrerer verschiedener Datenkonstellationen ist."²⁾ "Das zweite Merkmal der Ungewißheit besteht darin, daß sich die verschiedenen als glaubhaft angesehenen Datenkonstellationen im einzelnen nicht exakt bestimmen lassen. So kann man z.B. die zukünftige Höhe des Absatz- und Beschaffungspreises eines Gutes nicht exakt vorausschätzen, sondern nur einen Streubereich von 60 - 100 DM erkennen."³⁾ Mehrdeutigkeit der Zukunftsvorstellung und das Unvermögen, die verschiedenen Datenkonstellationen exakt zu bestimmen, sind also kennzeichnend für die mehrwertige Erwartung. Damit bedeutet die Unsicherheit hinsichtlich der zukünftigen Datenkonstellation, daß die Leitung keine Gewähr dafür hat, daß die von ihr angestrebte "objektive" Zielgröße auch wirklich die optimale Alternative darstellt.

So ist jede auf eine mehrwertige Erwartung aufbauende

1) Vgl. Koch, H.: Zur ..., a.a.O., S. 52/53; außerdem Wacker, J.: Entwicklung ..., a.a.O., S. 101 - 106. Wacker verwendet eine etwas andere Einteilung der Methoden der Informationsgewinnung: (1) Induktions- und Analogieschluß; (2) Monte-Carlo-Methode; (3) Bildung subjektiver Wahrscheinlichkeitszahlen; (4) Bildung von Gewißheitsäquivalenten.

2) Koch, H.: a.a.O., S. 53

3) Koch, H.: a.a.O., S. 55

"Zielfunktion" unsicher und die sich aus der Anwendung der "Zielfunktion" ergebende Entscheidung auch. Für den Verfahrensforscher bleibt bei mehrwertigen unsicheren Erwartungen nur die Aufgabe, Unterlagen quantitativer Art zu sammeln¹⁾ und dem Unternehmer wie eh und je die intuitive Entscheidung zu überlassen.²⁾

3. Fehlendes mathematisches Instrumentarium

Die Modelle stimmen in vielen Fällen nur deswegen mit der Wirklichkeit so wenig überein, weil nicht selten noch das mathematische Instrumentarium zu einer problemadäquaten Lösung fehlt.³⁾ Man denke dabei nur an das "Nichtlineare Optimieren", das "Parametrische Optimieren", das "Stochastische Optimieren"⁴⁾ oder die komplexeren Fälle der Lagerhaltung.⁵⁾

In vielen Fällen hat man bisher nur Spezialfälle lösen können, denn um allgemeingültige Lösungen finden zu können, ist ein längerer Zeitraum notwendig. Man denke nur daran, wie lange die "traditionelle" Mathematik zu ihrer Entwicklung gebraucht hat. Wenn man die Entwicklung dieser "neuen mathematischen Disziplin"⁶⁾ in ihren ersten

1) Vgl. Wittmann, W.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 287

2) Vgl. Moxter, A.: a.a.O., S. 198

3) Vgl. Kern, W.: Gestaltungsmöglichkeiten und Anwendungsbereich betriebswirtschaftlicher Planungsmodelle. In: ZfhF (NF) 1962 (14), S. 167 - 179, hier S. 178

4) Vgl. Krelle, W.: Gelöste und ungelöste Probleme der Unternehmensforschung. In: Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen. Heft 105. Hrsg.: Brandt, L. Köln - Opladen, S. 7 - 43, besonders S. 21/22

5) Vgl. Krelle, W.: Gelöste ..., a.a.O., S. 24/25

6) Krelle, W.: Gelöste ..., a.a.O., S. 39.
Diskussionsbeitrag von E. Peschl.

Jahren betrachtet, muß man sagen, daß die Fortschritte respektabel sind und der Meinung ANGERMANNs, daß einzelne Schwierigkeiten der rein mathematischen Bewältigung in nächster Zeit und bei verstärkter Anstrengung überwunden werden können, ist zuzustimmen.¹⁾ Auch die Beschränkungen, die sich aus der begrenzten Kapazität verwendeter elektronischer Rechanlagen ergeben, dürfen mit fortschreitender Entwicklung immer mehr schwinden.²⁾

4. Mängel im Informationswesen

Haben wir schon von den Schwierigkeiten der Erfassung der in der Zukunft liegenden Daten erfahren, so wollen wir uns hier kurz mit den Schwierigkeiten der Informationsgewinnung und -verarbeitung allgemein beschäftigen. Über diese Untersuchung können wir die lapidare Feststellung KRELLEs setzen: "Das Ergebnis kann nicht besser werden als die Zahlen, die mir geliefert werden."³⁾

a) Informationsgewinnung

Voraussetzung jeglicher Anwendung des Operations Research ist, daß das Rechnungswesen einer Firma in Ordnung ist.⁴⁾ Wenn eine Unternehmung über ihre Kosten und sonstigen Daten nicht Bescheid weiß, ist es sinnlos, mit Operations Research-Berechnungen zu beginnen, da Operations Research gewöhnlich eine Vielzahl von Zahlen erfordert, was nicht selten eigene betriebsstatistische Berechnun-

¹⁾ Angermann, A.: Entscheidungsmodelle ..., a.a.O., S. 12

²⁾ Vgl. Kern, W.: a.a.O., S. 75

³⁾ Krelle, W.: Gelöste ..., a.a.O., S. 32 - Diskussion

⁴⁾ Vgl. Krelle, W.: Gelöste ..., a.a.O., S. 32

gen erforderlich macht.¹⁾ So entsprechen die Einzelkosten, mit denen Operations Research gewöhnlich zu rechnen pflegt, im allgemeinen nicht den entsprechenden Kostenarten der traditionellen Selbstkostenrechnung und sind gesondert zu ermitteln. Einzelkosten sind hier nämlich diejenigen Kosten, die

- (1) "nicht entstehen würden, wenn man die betreffenden Produktarten in gegebenen Quantitäten nicht herstellen und absetzen würde,
- (2) entstehen, wenn man die betreffenden Produktarten in gegebenen Quantitäten erstellt und absetzt, verglichen mit dem Falle, bei welchem das nicht geschehen würde."²⁾ ³⁾

Die Schwierigkeiten der rechentechnischen Bestimmung, die Übertragung der theoretischen Erkenntnisse auf die betriebliche Wirklichkeit, bilden hier zusammen mit den Fehlern bei der Datenerfassung, die allgemein gemacht werden können, eine Beschränkung, die auch für die Anwendung des Operations Research gilt. Dabei lassen sich die Fehlerquellen in zwei Gruppen unterteilen:⁴⁾

Die erste Gruppe umfaßt Meßfehler, Stellenfehler, Rechenfehler, Benennungsfehler usw., also an sich vermeidbare Fehler, sofern mit allerhöchster Präzision gearbeitet würde. Eine solche Präzision ist aber nur bei äußer-

1) Vgl. Frencner, P.T.: Bestimmung des Produktionsprogramms ..., a.a.O., S. 591
Vgl. dazu auch Holt, C.C. - Modigliani, F. - Muth, J.F. - Simon, H.A.: Planning Production ..., a.a.O., S. 66/67 (Source of Cost-Information)

2) Frencner, P.T.: Bestimmung ..., a.a.O., S. 590/591

3) Es handelt sich hier um sogenannte Opportunitätskosten. Vgl. Hanssmann, F.: Operations Research ..., a.a.O., S. 79

4) Vgl. Wittmann, W.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 13/14

ster Anspannung - und deshalb praktisch eigentlich nie - zu erreichen. Darunter fällt etwa das Ergebnis, daß für eine Tagesration plötzlich 50 Eier - anstatt 50 g - als optimal empfohlen werden. Die zweite Fehlergruppe hat ihren Ursprung in der von uns mehrfach angedeuteten Tatsache, daß eine quantitative Feststellung bei vielen Größen nicht eindeutig erfolgen kann, sei es wegen der fehlenden Quantifizierbarkeit oder wegen der Ungewißheit zukünftiger Entwicklungen.

b) Informationsverarbeitung

Auch bei der weiteren Informationsverarbeitung können Fehler in Form von Verschlüsselungs-, Ablochungs- und Abrundungsfehlern auftreten. Auch in der Verwendung stochastischer Elemente liegt eine gewisse Gefahr, da "der Unternehmer seine Entscheidungen nicht mehr auf eindeutig gegebene Schnitt- und Grenzpunkte aufzubauen vermag, sondern auf Bereiche verwiesen wird."¹⁾ Untereres Erachtens gilt, was PETERS über die Handwerksbetriebe sagt - mit Einschränkungen - auch für viele Unternehmungen, nämlich, daß "die für das ökonomisch-mathematische Kalkül unerläßlichen Ausgangsgrößen in vielen Handwerksbetrieben in exakter Form noch nicht vorhanden sind"²⁾ und hier vorerst eine - wenn auch nicht unüberwindbare - Grenze in der Anwendung von Operations Research zu sehen ist.

5. Finanzielle, sachliche und personelle Grenzen

Die Anwendung der Verfahrensforschung wird nicht zuletzt dadurch begrenzt, daß sie relativ teuer ist. So belaufen

-
- 1) Wittmann, W.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 14
 - 2) Peters, B.: Operations Research als modernes Führungsinstrument und Hilfe handwerklichen Wirtschaftens. Göttingen 1962, S. 6

sich die Aufwendungen für ein einziges Operations Research-Projekt nach Zahlen aus den USA auf 10.000 - 100.000 Dollar und die durchschnittlichen jährlichen Kosten für einen Verfahrensforscher auf 20.000 Dollar.¹⁾ Diese Aufwendungen dürften vermutlich weiter gestiegen sein. Somit dürfte die Anwendung von Operations Research im wesentlichen auf Großbetriebe beschränkt bleiben.²⁾ Zu den einmalig anfallenden Operations Research-Projektkosten kommt noch die Notwendigkeit, umfangreiche Datenuntersuchungen durchzuführen. Die dazu erforderlichen technischen Apparaturen, insbesondere elektronische Datenverarbeitungsanlagen gehören heute - im Gegensatz zu den USA - selbst für unsere größeren Unternehmungen noch immer nicht zur selbstverständlichen Ausrüstung. Die sachlichen Aufwendungen im Gefolge einer Operations Research-Untersuchung dürften als ebenfalls beträchtlich und nur für relativ große Unternehmen als tragbar anzusehen sein. Die personelle Besetzung dürfte einmal, da die Zahl der ausgebildeten Verfahrensforscher noch gering ist, auf Schwierigkeiten stoßen und im übrigen, da immer ein Team aus verschiedenen Wissenschaftlern erforderlich ist, hohe fixe Kosten verursachen. Eine Anwendung bleibt also auf finanziell starke Unternehmungen³⁾ beschränkt, wenigstens so lange bis sich die Zuhilfenah-

1) Zeit um 1955 -

Vgl. Kulhavy, E.: Operations Research ..., a.a.O., S. 195

2) Vgl. Kulhavy, E.: Operations Research ..., a.a.O., S. 195

3) Käfer hat diesen Gesichtspunkt als einziger in der Definition berücksichtigt, indem er von der quantitativen Unterlagenbeschaffung für die von Leitern größerer Organisationen zu treffenden Entscheidungen spricht. Vgl. Käfer, K.: Betriebswirtschaftliche Verfahrensforschung im Dienste der Unternehmensführung. S. 109 - 141. In: Aktuelle Fragen der Unternehmung - Gedenkschrift für Alfred Walther. Hrsg.: Ulrich, H. - Trechsel, F. Bern 1957, hier besonders Seite 112

me von Beratungsgesellschaften allgemein durchgesetzt hat.¹⁾

6. Wirtschaftlichkeitsüberlegungen

Nicht zuletzt entscheidend für die Frage der Anwendung der Operations Research-Verfahren ist die Beantwortung, was man dabei gewinnt. Lohnt es sich überhaupt, ein Problem mit den Methoden der Verfahrensforschung zu bearbeiten? HARTMANN²⁾ meint dazu, daß die Wirtschaftlichkeitsgrenze der Anwendung von Operations Research in der Praxis schnell erreicht wird, wobei er noch zu bedenken gibt, daß in den Beispielen wohl immer eine Ertragssteigerung verzeichnet wird, dabei aber die Kosten für die Ermittlung der Ausgangsdaten und die Kontrollkosten nicht berücksichtigt werden. FAURE, BOSS und LE GARFF³⁾ zitieren KAUFMANN, der das Beispiel einer Luftfahrtsgesellschaft anführt, die durch Verwendung von Operations Research eine 18 %ige Ertragsverbesserung erzielen konnte und ein Beispiel aus der Eisenindustrie mit einer 6 %igen Kostensenkung. Sie geben aber zu, daß normalerweise die Verbesserung nur etwa 3 - 4 % beträgt, meinen aber, daß durch Berechnungen auf allen Teilgebieten der Unternehmung eine ansehnliche Summe entstehen kann. DANØ berichtet von einer Gesellschaft der Kugellagerindustrie, die unter Verwendung des linearen Programmierens bei der Programmplanung 100.000 Dollar/Jahr "verdient" hat.⁴⁾

1) Vgl. Peters, B.: Operations Research ..., a.a.O., S. 56

2) Vgl. Hartmann, B.: Die Weiterentwicklung der Betriebswirtschaftslehre. In: ZfB 1963 (33), S. 65 - 75, hier S. 75

3) Vgl. Faure, Boss, le Garff: Grundkurs ..., a.a.O., S. 96

4) Vgl. Danø, S.: Linear Programming in Industry: Theory and Applications. An Introduction. Wien 1960, S. 56

Bei Betrachtung all dieser Beispiele glauben wir allgemein sagen zu können, daß es sich für große Unternehmen wohl lohnen kann, Operations Research anzuwenden. Das gilt besonders dann, wenn die Ersparnis als absoluter Betrag die fixen und laufenden Kosten einer Operations Research-Untersuchung weit übertrifft.

Teil 2

Anwendungsmöglichkeiten von Operations Research im Fertigungsbereich der Glasfabrik

=====

Bevor wir dazu übergehen, die einzelnen Fälle der Anwendungsmöglichkeiten zu untersuchen und darzustellen, wollen wir die Glasherstellung allgemein und speziell im Hinblick auf unser Darstellungsobjekt einer näheren Kennzeichnung unterziehen.

A) Geschichte und Herstellung des Glases¹⁾

I. Kurzer geschichtlicher Überblick der Glasfabrikation

In welchem Land das Glas²⁾ erfunden worden ist, läßt sich heute nicht mehr feststellen und spielt auch in unserem Zusammenhang keine große Rolle. Fest steht, daß es sich bei der durch PLINIUS³⁾ in seinem Werk "Historia

1) Weitere Hinweise über dieses Gebiet finden sich bei Vopelius, E.: Entwicklungsgeschichte der Glasindustrie Bayerns, Stuttgart 1895; Schulz, H.: Die Geschichte der Glaserzeugung. Leipzig 1928; Schupp, R.: Das Tafelglas als Kultur-, Erzeugungs- und Wirtschaftsfaktor in Deutschland. Manuskript im Besitz der Detag, Fürth i.B.

2) Über die Herkunft des Wortes Glas vergleiche Schnauck, W.: Glaslexikon - Ein Handbuch für Handwerk, Handel und Industrie. München 1959, S. 94

3) Vgl. Vavra, J.R.: Das Glas und die Jahrtausende. Prag 1954, S. 25. Ein wahrer Hintergrund scheint auch hier vorhanden zu sein, denn im "Jüdischen Krieg" des Josephus Flavius heißt es an einer Stelle, daß der Sand, in dem die im Flusse Belus getauften oder auch ungetauften Kinder spielten, eine berühmte Rohstoffbasis der syrischen Glashütten von Tyrus und Sidon gewesen sein soll.

naturalis" berichteten ersten Herstellung um eine Legende handeln muß. Dabei wird phönikischen Seeleuten, die für ihre Feuerstelle in der Flußmündung des Belus Soda-
blöcke verwendet haben - in Verbindung mit dem darunterliegenden Sand - die erste ungewollte Glasherstellung zugeschrieben. Da die Temperatur eines offenen Feuers nicht ausreicht, einen Glasfluß zu erzeugen, kann es sich nur um eine legendenhafte Ausschmückung der Erfindung dieses, für die Menschheit so großartigen Kulturgutes handeln. Belegt ist, daß etwa 4000 v. Chr. in Ägypten und Mesopotamien die Kunst des "Glas machens" bekannt gewesen ist. Theben bildete damals den Mittelpunkt einer weltbekannten und auf hoher Entwicklungsstufe stehenden "Glasindustrie". Bei Ausgrabungen sind Glasgegenstände gefunden worden, die den Namen eines 1900 v. Chr. regierenden Königs getragen haben.

Schon weit vor dieser Zeit (5000 v. Chr.) hat man im Nahen Osten glasierte Töpferwaren hergestellt, deren Glasur durch Zusammenschmelzen von Quarzsand, Muschelkalk und Alkali gewonnen worden ist.

Ob die Glasherstellung von den Ägyptern ausgehend von anderen Völkern übernommen worden ist, oder ob sie - besonders die des asiatischen Raumes - diese Kunst selbst entwickelt haben, läßt sich heute nicht mehr feststellen; doch neigt die Geschichtsforschung zu der Ansicht, daß die Kunst der Glasherstellung durch die einzelnen Völker unabhängig voneinander erfunden worden ist.¹⁾

Bis zu Beginn unserer Zeitrechnung haben sich die Herstellungsverfahren auf Gießen und Pressen beschränkt und

1) Vgl. Kubatz, H.: Standorttendenzen und Standortverlagerungen in der deutschen Flachglasindustrie vom betriebswirtschaftlichen Standpunkt. Ohne Ort, S. 9
Weitere Einzelheiten zur Geschichte des Glases finden sich besonders bei Vavra, J.: a.a.O., S. 13 -
198

erst mit der Erfindung der Glasbläserpfeife zu dieser Zeit kam das Glasblasen als Herstellungsart hinzu.¹⁾

Die Technik des Glasblasens hat sich innerhalb eines Jahrhunderts über die ganze damals bekannte Welt ausgebreitet und ist auch in die rheinischen und gallischen Grenzgebiete - dem heutigen Belgien - des römischen Imperiums gekommen. Dieses Herstellungsverfahren mit Hilfe der Glasmacherpfeife hat sich dann bis in die 20er Jahre unseres Jahrhunderts kaum verändert. Dabei holt der Glasmacher mit der Pfeife - ein 1 1/2 bis 2 m langes Eisenrohr mit aufgesetztem Mundstück - aus der zähflüssigen Glasmasse (Temperatur 1150°C - 1200°C) einen größeren Klumpen Glasmasse und formt durch geschicktes Drehen und Blasen bei wiederholtem Anwärmen einen Zylinder - die sogenannte Walze. Nach dem Erkalten muß das untere Ende, die Kappe, und das obere Ende, der Nabel, abgesprengt werden; der Hohlzylinder wird der Länge nach aufgeschnitten und im sogenannten Streckofen bis zum Erweichungspunkt erwärmt, um auf der Streckplatte mit dem Polierholz geebnet und geglättet zu werden. Daß sich hierbei Grenzen in Qualität und Größe ergeben, ist offensichtlich.²⁾

In der geschichtlichen Entwicklung ist auch mit dem römischen Reich die "Glasindustrie" verfallen und kommt erst im 10. Jahrhundert, von Italien ausgehend, in Thüringen, Böhmen, Sachsen und Schlesien wieder zur Blü-

1) Erfindung in Sidon nach Kubatz, H.: a.a.O., S. 9 oder Pompeji nach Flessa, K.: Über die Herstellung von Tafelglas. In: Glaswelt 1964 (17), S. 320 - 321, hier S. 320

2) Vgl. Flessa, K.: a.a.O., S. 320 - 321

te.^{1) 2)} In diese Zeit fällt auch der Beginn der venezianischen Glasindustrie. Um 1200 gründet man eine mächtige Zunft und verlegt die Produktion zur Wahrung des Fabrikationsgeheimnisses auf die Insel Murano. In den nächsten zwei Jahrhunderten überflügeln die Venezianer all ihre Konkurrenten und werden führend auf dem Gebiet der Glasforschung und -herstellung. In Deutschland entsteht während dieser Zeit der Typ der sogenannten "Waldglashütten", die bis zum 18. Jahrhundert vorherrschend bleiben. Diese geheimnisumwitterte Glasherstellung in den versteckten Glashütten³⁾, deren Produktionsweise sich vom Vater auf den Sohn weitervererbt, ist natürlich

-
- 1) Vgl. Kubatz, H.: a.a.O., S. 11. - In bezug auf Böhmerwald und Bayerischen Wald konnte dies urkundlich aber erst für das 14. Jahrhundert nachgewiesen werden. Vgl. Holl, F.: Die bayerische Glasindustrie - gestern, heute, morgen. Wirtschafts- und sozialpolitische Studie über die Entwicklung der Glasindustrie des Bayerischen und Oberpfälzer Waldes. Zwiesel 1965, S. 1
 - 2) Vgl. Vopelius, E.: Entwicklungsgeschichte der Glasindustrie Bayerns (nach seinem heutigen Umfang) bis 1806. Stuttgart 1895, S. 10 - 29, besonders S. 18/19
 - 3) Ursache dieser Weltabgeschiedenheit der Glasproduktion in den Wäldern Thüringens, Böhmens und Bayerns ist neben der Geheimnisbewahrung und Befuerung (8 Ztr. Holz für 1 Ztr. Glas) aber vor allem die zur Glasherstellung als Flußmittel notwendige Pottasche (K_2CO_3), die aus der Verbrennung von Holz und Pflanzen gewonnen wird und mit einem Drittel an dem Gesamtgemenge beteiligt ist. Wenn berücksichtigt wird, daß zur Erzeugung von 1 kg gebrauchsfertiger Pottasche 1000 kg Holz erforderlich sind, kann man sich leicht vorstellen, daß durch das "Aschenbrennen" ganze Waldgebiete verwüstet worden sind. Vgl. Kubatz, H.: a.a.O., S. 39. Erst als 1787 der Franzose Nicolas Leblanc den Grundstein zur künstlichen Erzeugung des Sodas (Na_2CO_3) legt und zur gleichen Zeit die Erzeugung von Glaubersalz aufkommt, kann, seit Anfang des 19. Jahrhunderts, das Naturprodukt Holzasche durch chemische Erzeugnisse ersetzt werden. Dies war auch die Ursache dafür, daß später in Verbindung mit der größeren differenzierten Nachfrage und kapitalintensiveren großtechnischen Herstellung eine Standortverlagerung stattgefunden hat.
Vgl. Kubatz, H.: a.a.O., S. 46 - 48

dem technischen Fortschritt nicht besonders aufgeschlossen gewesen. Jeder Hüttenbesitzer bewahrt seine Produktionsweise eifersüchtig, ja die Venezianer lassen sogar geflüchtete Glasmacher zur Vermeidung der Weiterverbreitung der Produktionsverfahren durch einen Bravo (Meuchelmörder) ermorden.¹⁾

Die Fertigungsprogramme der Glasindustrie weisen bis zum 19. Jahrhundert eine große Streuung auf, da es durch Verwendung nahezu der gleichen Rohstoffe und Produktionstechnik möglich gewesen ist, neben Flachglas, billige Gebrauchsgegenstände und Luxusartikel in einer Produktionsstätte zu fertigen.

Der steigende Bedarf des 19. und 20. Jahrhunderts²⁾ in Verbindung mit dem technischen Fortschritt und neuen naturwissenschaftlichen Erkenntnissen führt dann auch dazu, daß die universelle "Glashütte" sich in immer speziellere Produktionszweige aufteilt. So entstehen folgende Produktionszweige, die auch heute noch oft vertikal in einer einzigen Unternehmung zusammengeschlossen sein können:

- (1) Hohlglaserzeugung
(Herstellung von Glasgefäßen aller Art)
- (2) Flachglaserzeugung
- (3) Glasfaser- und Glasseideerzeugung
- (4) Glasverarbeitung und/oder Glasveredelung der Erzeugnisse 1 - 3

Hiervon interessiert uns besonders die Flachglaserzeugung und davon wieder das sogenannte maschinell gezogene Tafelglas. Einen Überblick über die verschiedenen

1) Vgl. Kubatz, H.: a.a.O., S. 43

2) Vgl. Gebhardt, A.: Glasindustrie - Strukturelle Probleme und Wachstumschancen. Ifo - Institut für Wirtschaftsforschung. München 1964. Reihe Industrie - Heft 2, S. 24/25

Flachglasherstellungsverfahren und deren Produkte gibt nachfolgendes Schema wieder:¹⁾

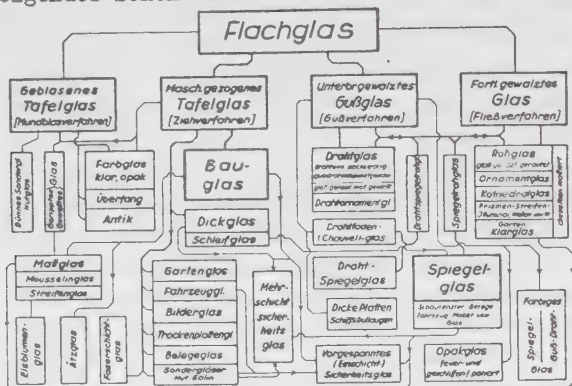


Abb.: Schematische Darstellung des Zusammenhangs der verschiedenen Glasherstellungsverfahren. (Die mit Pfeilen versehenen Verbindungslinien deuten jeweils den Fabrikationsgang an.)

Quelle: Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas. Essen, 1. Aufl. 1950, S. 12

Eine spezifischere Einteilung mit Dickenmaßen läßt sich dem folgenden Schema entnehmen:²⁾ (Schema siehe Seite 193)

II. Rohstoffe und Gemengezusammensetzung

Bevor wir uns den heutigen großtechnischen Verfahren zur Tafelglasherstellung zuwenden, wollen wir einen kurzen Blick auf die Rohstoffe und die Zusammensetzung des Gemenges werfen.

1) Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas. Eine Werkstoffkunde für alle Verbraucher des Tafelglases, für das Glaserhandwerk und das Baugewerbe m. 417 Fotos und Zeichnungen. Essen, 1. Aufl. 1950, S. 12

2) Jebesen-Marwedel, H.: a.a.O., S. 11

TAFELGLAS

	Dünnglas	Fensterglas (Bauglas)	Dickglas
0,6 - 0,8 mm		ED	
0,8 - 1,2 mm		1,8 - 2,0 mm	4,0 - 5,0 mm
1,2 - 1,5 mm		MD	
		2,8 - 3,0 mm	5,0 - 6,0 mm
1,5 - 1,8 mm		DD	
		3,6 - 4,0 mm	6,0 - 7,0 mm
je nach Ver- wendung	Sorte ¹⁾ 1	Sorte 2	Gärt- nerei- glas
			Auto- glas
			AV ausge- suchte Vergla- sung
			V Vergla- sung

1. Sand

Kieselsäure (SiO_2) in Form sehr reinen Quarzsandes bildet den Hauptbestandteil des Gemenges zur Glasherstellung.

Der Schmelzpunkt der Kieselsäure liegt je nach ihrer Modifikation bei $1477 - 1700^\circ\text{C}$. Um daraus allein Glas zu machen, wäre es nötig, Temperaturen von 2000°C zu erzeugen. Das ist aber für normale Gläser nicht durchführbar und auch nicht erforderlich, da es durch das Zugeben geeigneter Stoffe - sogenannte Flußmittel - gelingt, den Quarz bei bedeutend tieferen Temperaturen in den "Schmelzzustand" zu versetzen. In erster Linie handelt es sich bei den Flußmitteln um Natriumoxyd (Na_2O).²⁾

1) Der hier angeführte Sortenbegriff wird unabhängig vom betriebswirtschaftlichen Sortenbegriff in der Glasfabrik zur Qualitätsunterscheidung verwendet.

2) Vgl. Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas ..., a.a.O., S. 16 - 21

2. Soda¹⁾

Das als Flußmittel notwendige Natriumoxyd wird heute in Form des kohlesauen Natriums (Na_2CO_3), Soda genannt, zugesetzt. Dabei handelt es sich nicht um die im Haushalt gebräuchliche wasserhaltige Kristallsoda, sondern die wasserfreie, gebrannte Soda, die als Solvay-Soda in großer Reinheit hergestellt wird (sogenannte 99 %ige Soda). Chemisch reagiert die Soda durch Zersetzung und Freisetzung von Kohlendioxyd.

3. Sulfat

Zur Erzielung verbesserter Schmelzleistungen ist die Soda stets von dem schwefelsauren Salz des Natriums (Na_2SO_4) - wasserfreiem Glaubersalz - begleitet. Das Sulfat liefert ebenfalls Natron ins Glas, ist aber - unter Zugabe von Kohlestaub - schwerer zersetzbar und schmelzbar als Soda. Zurück bleibt vielfach wenigstens ein kleiner Teil unzersetzten Sulfats, das sich als sogenannte "Glasgalle" auf der schmelzenden Glasmasse absondert.

4. Kalkstein

Das weiter zur Erzeugung einer technisch brauchbaren Glasschmelze notwendige Kalzium liefert der in der Natur weit verbreitete Kalkstein (CaCO_3) - als Kalkspat, Marmor, Kreide und gewöhnlicher Kalkstein. Außerdem setzt man Dolomit zu, ein ebenfalls in großen Mengen vorkommendes natürliches Gestein, in dem neben Kalziumkarbonat noch Magnesiumkarbonat enthalten ist, so daß der Glasfluß neben Kalziumoxyl auch Magnesiumoxyd ent-

¹⁾ Vgl. ebenfalls Springer, L.: Lehrbuch der Glastechnik. 5. Aufl., 1963. Düsseldorf. S. 25 ff.

hält, was ihm ein für die Fabrikation geeignetes Verhalten verleiht.

Die Mineralien (Kalk, Dolomit) werden aus natürlichen, hinsichtlich Reinheit und Gleichmäßigkeit sorgfältig ausgewählten Vorkommen (Steinbrüchen) gewonnen und gewöhnlich noch an Ort und Stelle auf die gewünschte Korngröße zerkleinert.

5. Seltenere Rohstoffe¹⁾

Für besondere Glassorten werden auch noch andere Schmelzstoffe verwendet. Am wichtigsten hiervon ist Mennige, ein schweres, rotes Pulver, seiner chemischen Natur nach ein an Sauerstoff reiches Bleioxyd, mit dem die Bleigläser hergestellt werden; Bleioxyd verleiht dem Glas einen größeren Glanz und auch höheres Gewicht sowie leichtere Schmelzbarkeit. Manchmal nimmt man statt Mennige oder Kalk auch kohlesauren Baryt, der das Glas in ähnlicher Weise verbessert wie Bleioxyd.

Für physikalische und chemische Sondergläser gebraucht man Borsäure bzw. Borax, das ist borsaures Natron, als Zusatz, weil die Borsäure das Glas sehr widerstandsfähig gegen Temperaturwechsel macht. Auch Zinkoxyd (Zinkweiß) wird verwendet.

Für reinweiße Glassorten, besonders Kristallglas, nimmt man statt Soda ganz oder teilweise Pottasche, das ist kohlesaurer Kali, das sich in der Glasschmelze fast genau so verhält wie Soda. Heute ist dabei weitgehend an die Stelle der Holz-Pottasche die Mineralpottasche, die aus Kali-Abraumsalzen gewonnen wird, getreten.

1) Vgl. Springer, L.: a.a.O., S. 28/29

6. Gemengezusammensetzung

Das Gemenge setzt sich ungefähr nach folgendem Verhältnis zusammen:¹⁾

Sand	58,6
Soda	17,5
Sulfat	3,5
Kalkstein	10,4
Dolomit	10,0 Teile,

wobei es aber auch hier von dem jeweiligen Rohstoff selbst und von dem herzustellenden Glas abhängt, inwieweit dieses Verhältnis variiert wird. In der genauen Zusammensetzung ist das Mischungsverhältnis ebenso wie in früheren Zeiten Produktionsgeheimnis, obwohl es weitgehend nur auf die jeweilig vorhandenen Rohstoffqualitäten bezogen und auch nur in Verbindung mit denselben brauchbar ist. Zu den obenangegebenen Rohstoffen tritt außerdem noch ein Anteil Scherben zur besseren Läuterung und zur Herabsetzung der Schmelztemperatur.

III. Das Schmelzen des Glases und die großtechnische Tafelglasherstellung

1. Schmelzvorgang^{2) 3)}

Nachdem das Gemenge eingelegt ist, entweicht zuerst die Feuchtigkeit. Während die Temperatur im Ofen ansteigt, entsteht früher als dies dem Schmelzpunkt jedes seiner Bestandteile (etwa ab + 850°C) entsprechen würde, ein zähflüssiges Gemenge. In ihm wirken bei weiterer Erhit-

1) In Anlehnung Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas ..., a.a.O., S. 19

2) Nähere Einzelheiten mit der Darstellung der chemischen Reaktionen finden sich bei Kitaigorodski, J.J. (Gesamtredaktion): Technologie des Glases. München - Berlin 1957, S. 120 ff., der den Glasschmelzprozeß in 5 Stadien einteilt: Silikatbildung, Glasbildung, Läuterung, Homogenisierung und Abstehen.

3) Vgl. dazu auch Springer, L.: a.a.O., S. 62/63, sowie Schnauck, W.: a.a.O., S. 94

zung die Kieselsäure, die Soda und der Kalkstein sowie die anderen Zusätze in einem verwickelten chemischen Prozeß so aufeinander ein, daß sich eine dünnflüssige klare Masse, die wir eben als Glas bezeichnen, ergibt (Rauhschmelze).

Noch aber ist die Glasmasse sehr zäh, ganz ungleichmäßig und vor allem von vielen Luft- und Gasblasen durchsetzt. Um nun eine möglichst gleichmäßige und blasenfreie Glasmasse zu bekommen, wird einmal die Hitze gesteigert - es folgt das sogenannte Blankschüren des Glases - und zum anderen greift man zur sogenannten künstlichen "Läuterung" des Glases. Durch die gesteigerte Temperatur wird die Masse schon dünnflüssiger und das Gas kann entweichen, weiter unterstützt man diesen Vorgang durch die Zugabe von Arsenik, der in der Glasmasse untersinkt und dann unter Werfen großer Blasen rasch verdampft, wobei kleine "Blasen" und Gispfen mitgerissen werden.¹⁾ Dieser Vorgang wird als "Blasenlassen" oder "Bülvern" des Glases bezeichnet. Durch all diese Maßnahmen wird die Glasmasse homogen und damit frei von Schlieren.

Während sich im Hafenofen²⁾ und in der Tageswanne diese Vorgänge nacheinander abspielen, geht in der Dauerwanne die ganze Schmelze zeitlich wohl auch nacheinander, aber örtlich nebeneinander vor sich, d.h. die Rauhschmelze erfolgt im sogenannten Schmelzraum, dann wandert die Glasmasse zur Feinschmelze in den Läuterungsraum, und endlich zum Abstehen und zur Ausarbeitung in den Arbeitsraum. Hierbei spielen somit die Glasströmungen eine wichtige Rolle; wenn das Glas nicht gleichmäßig vom Schmelzraum zum Arbeitsraum fließt, sondern teils eine Rück-

1) Es gibt noch andere Möglichkeiten, darunter das Einführen von Gasen oder die Verwendung von Ultraschall.

2) Mehr über die einzelnen Ofenarten und deren Beheizung in Springer, L.: a.a.O., S. 33 ff. und Kitaigorodski, J.J.: a.a.O., S. 285 ff.

strömung in den tieferen Zonen einsetzt, teils Querströmungen auftreten, kann darin eine Fehlerquelle liegen. Man muß daher diese Strömungen richtig zu lenken und zu beherrschen versuchen, was durch Einhaltung verschiedener Temperaturen in den einzelnen Zonen der Wanne sowie durch den Einbau von Brücken, Durchlässen und Schirmwänden (bis zu einem gewissen Grad) möglich ist.

2. Die Tafelglasherstellung heute

Nachdem wir bisher einen kurzen Überblick über Geschichte, Rohstoffe und Schmelzprozeß der Glasherstellung gegeben haben, wollen wir im folgenden die heute angewandten Verfahren einer näheren Betrachtung unterziehen, bevor wir uns der speziellen Darstellung unseres Beispiels widmen. Wir haben unseren geschichtlichen Überblick bisher mit dem 19. Jahrhundert enden lassen und nur auf den wachsenden Bedarf in der folgenden Zeit hingewiesen, zu dessen Befriedigung es einer grundlegenden Wandlung der Erzeugungstechnik bedarf. Seit fast 2000 Jahren hat man Tafelglas im Zylinderstreckverfahren hergestellt, und konnte dabei die Größe und die Qualität der Gläser kaum verbessern.

Erst im Laufe der letzten Jahrhunderte sind die Voraussetzungen geschaffen worden, die zu einer Ablösung des alten Verfahrens führen und zu Beginn unseres Jahrhunderts einen grundsätzlichen Wandel der Tafelglasherstellung mit sich bringen.

Die wachsende Holzarmut und staatliche Verbote führen zur Umstellung auf Kohlefeuerung,¹⁾ den Bau von Wannen-

1) 1623 erhält der Engländer Mansell ein Patent auf die Verwendung der Steinkohle zur Beheizung der Glasöfen. 1740 gibt es in England 14 Glasfabriken, die ihre Öfen mit Steinkohle beheizen. 1784 wird im Saargebiet

öfen und der Entwicklung neuer Befeuerungstechniken, als eine der wesentlichsten Voraussetzungen für eine neue Technik. Dieser Prozeß findet auf dem Gebiet des Wannenbaus mit der Erfindung und Einführung des regenerativ gasbeheizten Wannenofens durch Friedrich SIEMENS 1867 einen vorläufigen Abschluß.¹⁾

Nachdem schon im Jahre 1857 der Engländer Clark versucht hat, ein Glasband direkt aus der Wanne zu ziehen, ihm aber kein Erfolg beschieden gewesen ist, gelingt es 1904 dem Belgier FOURCAULT und 1905 dem Amerikaner COLBURN, dieses Problem zu meistern und damit den Grundstein zur kontinuierlichen maschinellen Glasherstellung zu legen.²⁾

3. Das FOURCAULT-Verfahren³⁾

Die Idee, das Glasblatt frei aus der Oberfläche zu ziehen, hat natürlich, wie der Mißerfolg des Engländers CLARK beweist, schon lange bestanden. Aber erst FOURCAULT gelingt es, die Wirkung der Oberflächenspannung, die das Ziehen einer Glastafel bisher immer scheitern ließ, in einer ebenso genialen wie einfachen Weise zu überwinden. Die Oberflächenspannung will einem Stoff auf kleinster

1) Fortsetzung von Seite 198:

die erste mit Kohle beheizte deutsche Glashütte errichtet.

Vgl. Vopelius, E., Entwicklungsgeschichte, a.a.O., S. 91/92 und

Völckers, O.: Glas und Fenster. Berlin 1939, S. 32

1) Vorteile: - 30 % Brennstoffersparnis

- genaue Temperaturregelung möglich

- Verringerung der Schmelzdauer

2) Vgl. Beyersdorfer, P.: Glashüttenkunde. Leipzig 1964, S. 19

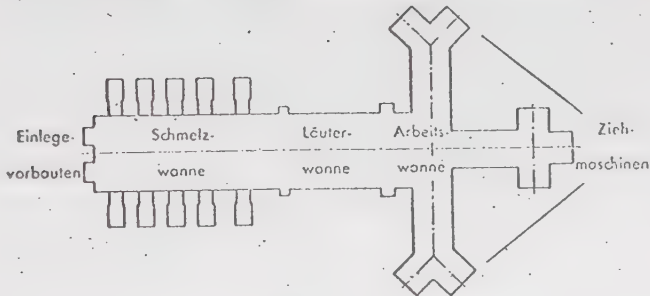
3) Das FOURCAULT-Verfahren ist mit deutscher und österreichischer Hilfe bis 1914 zur Betriebsreife entwickelt worden.

Oberfläche einen größtmöglichen Inhalt geben. Das Ziehen einer Glastafel ist aber weiter nichts als die Vergrößerung der Oberfläche einer Glasmasse, wobei die Oberflächenspannung senkrecht zur Ziehrichtung wirkt. Die Folge ist, daß die Glastafel immer schmaler wird, je weiter man sie emporzieht, bis schließlich ein Glasfaden von etwa kreisrundem Querschnitt entsteht. Um dies zu verhindern, hat nun FOURCAULT das Glasband nicht aus der Oberfläche des Glasbades gezogen, sondern läßt es aus einem Schlitz eines in das Glasbad gedrückten Schamottebalkens (Ziehdüse) herausquellen, wodurch die Wirkung der Oberflächenspannung aufgehoben wird. Das aus dem Schlitz dieser Ziehdüse, die auf dem glutflüssigen Glasatz schwimmt, herausquellende Glasband wird zu Beginn mit einem an Metallbändern befestigten Fangeisen, an dem die erstarrende Glasmasse klebt, langsam und mit Unterstützung von Asbestwalzenpaaren im sogenannten Zieh-schacht senkrecht nach oben "gefahren". Ist das Glasband zu Beginn des Ziehens noch unregelmäßig dick, so reguliert sich das je nach Geschwindigkeit zu einer regelmäßigen Glasstärke von 0,6 - 12 mm, wobei natürlich die Zuhilfenahme des sogenannten Fangeisens nur zu Beginn des Anfahrens notwendig ist. Dieses Hochfahren des Bandes gehört zu den interessantesten Vorgängen bei der Tafelglasfabrikation. Der Schacht der Ziehmaschine, in dem meistens 14 - 16 Asbestwalzenpaare enthalten sind, ist etwa 6 - 8 m hoch und an den Seiten von Kühlkästen umgeben, die das Glas so rasch wie möglich abkühlen sollen. Am oberen Ende des Zieh-schachtes kann das Glasband dann abgeschnitten und im Schneidhaus von der Borte befreit (dicke Seitenränder) und auf die angeforderten Maße zugeschnitten werden.

Die Glasschmelzwanne nach FOURCAULT ist ein 30 - 40 m langer und 7 - 11 m breiter Ofen. Der Glasstand beträgt etwa 1,20 - 1,60 m. Das Fassungsvermögen liegt bei 1000 - 1200 t flüssigem Glas. Die Wanne ist in drei Ab-

schnitte aufgeteilt: in die Schmelz- und Läuterwanne sowie die Arbeitswanne mit drei Arbeitskanälen mit heute meist je drei Ziehmaschinen. Die Ausbildung der Arbeitswanne ist bei den einzelnen Ziehverfahren verschieden.

Zur Verdeutlichung des Gesagten sollen die nachfolgenden Skizzen über Wanne, Ziehvorgang und Düse dienen.¹⁾



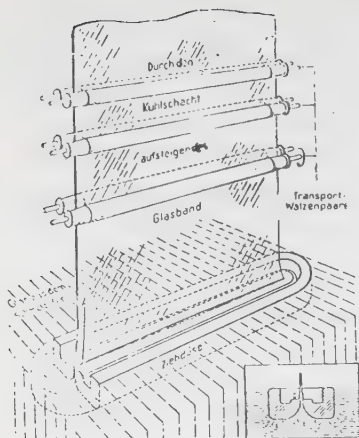
Die Glasschmelzwanne nach FOURCAULT

Quelle: Firmenzeitschrift Deutsche Libbey-Owens-Gesellschaft (Delog), Febr. 1961, o.S.

Die Glasschmelzwanne nach FOURCAULT hat drei Arbeitskanäle. An den beiden Seitenkanälen sind je zwei²⁾ und am Mittelkanal drei Maschinen angeschlossen. Während beim LIBBEY-OWENS-Verfahren nur Oberflächenglas verarbeitet wird, zieht man hier das Glas aus der vollen Tiefe durch eine Schlitzdüse aus feuerfestem Material.

1) Die folgenden Schemata entstammen der Firmenzeitschrift der Deutschen Libbey-Owens-Gesellschaft (DELOG) Febr. 1961, o.S.

2) heute gewöhnlich drei



Schema des Ziehvorganges nach FOURCAULT

Die geläuterte Glasschmelze wird als endloses Band durch die aus feuerfestem Material bestehende Ziehduse senkrecht herausgezogen und von beiderseits unter Druck auf dem bereits erstarrten Glasband anliegenden Walzenpaaren weiter nach oben geführt.

Unten rechts die Ziehduse im Schnitt

Quelle: Firmenzeitschrift
DELOG, Febr. 1961,
o.S.

Neben dem FOURCAULT-Verfahren gibt es noch zwei weitere Verfahren, nämlich das LIBBEY-OWENS-Verfahren¹⁾ und das PITTSBURGH-Verfahren²⁾. Beide zeigen in bezug auf Schmelzwanne, Ziehduse und Ziehvorgang nur geringfügige Unterschiede zum FOURCAULT-Verfahren. In neuester Zeit kam dazu ein weiteres Verfahren, das sogenannte FLOAT-Verfahren³⁾, das bisher nur im Prinzip bekannt ist. Auf weitere Einzelheiten soll aber hier verzichtet werden.

1) Vgl. dazu im einzelnen "DELOG", Febr. 1961

2) Vgl. Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas ..., a.a.O., S. 38 - 40

3) Vgl. Herlt, R.: Britische Glas-Revolution. In: Die Welt, Nr. 188, v. 16.8.1965, S. 8;
o.V.: Spiegelglas ohne Schleifen. In: FAZ v. 27.8. 1963;
o.V.: Europäische Hütten produzieren "Float Glass". In: Glaswelt 1963 (7), H. 5, S. 127 - 128;
Higham, J.B.: Qualitäts-Tafelglas durch Float-Verfahren. In: Glas-Email-Keramo-Technik 1963, S. 211 - 213

4. Zusammenfassende zeichnerische und beschreibende Darstellung der unserem Beispiel zugrundegelegten Tafelglasherstellung nach FOURCAULT

Zur Erleichterung später notwendiger näherer Erläuterungen wollen wir die für uns interessante Tafelglasherstellung (FOURCAULT-Verfahren) noch einmal zeichnerisch und beschreibend in seiner Gesamtheit darstellen und dabei auch gleichzeitig eine Unterteilung vornehmen.

Die einlaufenden Rohstoffe werden im Rohstofflager (Ziff. 1 - 3) eingelagert und dann zur Gemengebereitung abgegeben (Ziff. 4). Die Beschickung der Wanne und der anschließende Ziehvorgang bis zum Abbrechen sei als "Wannen- und Ziehbetrieb" zusammengefaßt (Ziff. 5 - 18).

Nachdem die Tafel auf der "Abbrechbühne"¹⁾ abgebrochen worden ist, geht sie zum Schneiden ins Schneidhaus (Ziff. 18 - 23), wo sie je nach Dicke des Glases (Dickglas, Bauglas, (ED, MD, DD, Dünnglas) und unter Berücksichtigung des Auftrags (festgelegte oder variierende Maße, Exporte, ... Frei- und Festmaße) von verschiedenen ausgerüsteten Schneidgruppen (automatische und halbautomatische Schneidtische, Dickglasschneider, Dünnglasschneider ...) weiter bearbeitet wird. Das Sortieren nach Qualitäten wird zum Teil vor dem Schneiden, aber auch während und nach dem Schneiden durchgeführt. Vereinheitlichend könnte man dafür eine eigene Stelle für Feinsortierung (Ziff. 23) nach dem Schneidvorgang annehmen; es kann aber auch darauf verzichtet und das ganze Sortieren kann unter dem Schneidvorgang subsumiert werden. Dies ist im wesentlichen wohl von der betrieblichen Konvention und der Qualität des Glases abhängig. Vielfach wechselnde Glasqualität tendiert zur Sortierung vor dem Schneidvorgang, um das Risiko des Verschnitts zu vermindern. Hohe Qualitäts-

1) Wird im folgenden auch oft "Ziehbühne" genannt.

anforderungen bedingen dazu außerdem eine Nachsortierung (Feinsortierung).

Die Verpackung und Versendung (Ziff. 25 - 26) des geschnittenen Glases durch die Packerei¹⁾ - je nach Glasart unterschiedliche Verpackung - schließt den Herstellungsvorgang ab.²⁾

Schema siehe Seite 205.

1) Expedition einbezogen

2) Das Schema entstammt Thoma, L.: In einer Glashütte für Flach- und Fensterglas. In: Klöckner-Moeller Post 1955, S. 54 - 63, hier S. 55

Tafelglas-Ziehverfahren nach FOURCAULT

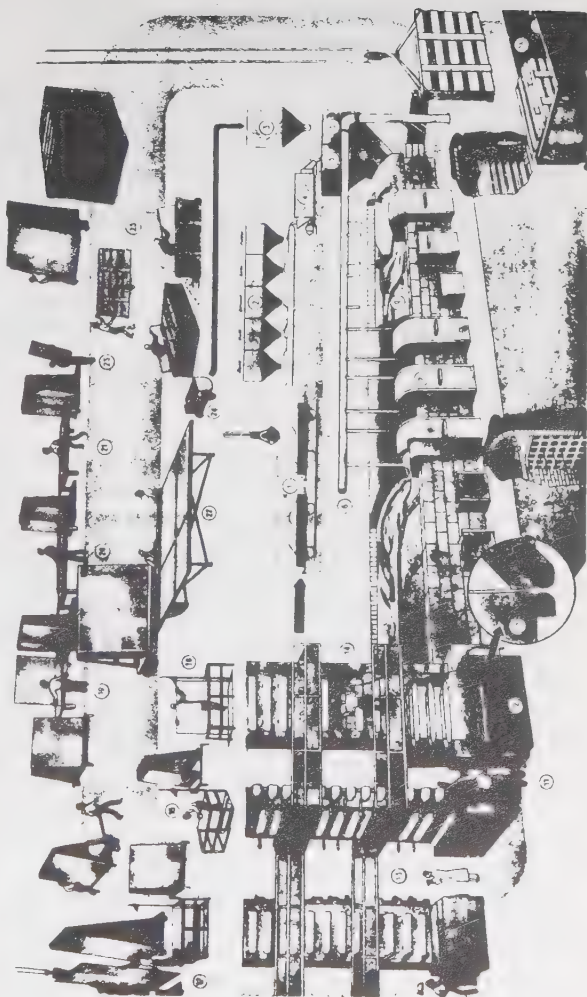
TAFELGLAS-ZIEHVERFAHREN NACH FOURCAULT

- 1 Im Wagon einlaufende Rohstoffe
- 2 Rohstoff-Vorratsbehälter, Abwiegen und Einbringen der Rohstoffe in die Mischmaschine
- 3 Scherbenbunker
- 4 Mischen der Rohstoffe zu einem homogenen Gemenge
- 5 Beschickung des Schmelzofens mit Gemenge und Scherben
- 6 Gasezuführungseitung (Gasbedarf 70000 m³/24 Std. je Ofen)
- 7 Brenner (halbstündlich die Flammrichtung wechselnd)
- 8 Vorwärmlammer für Verbrennungsluft

Tagesproduktion je Ofen etwa 27 000 dm³

- 9 Inneres des Schmelzofens mit Gemengeheulen Temperatur 1450°C, Ständiger Inhalt des Ofens ca. 1100 t flüssiges Glas
- 10 Schwimmers zur Reinerhaltung der Schmelzoberfläche, Temperatur 1200°C
- 11 Glasziehmachine im System Fourcault
- 12 Glasziehmachine im Schlift, mit Ziehstäbe und aufsteigenden Glasband, Temperatur 800°C
- 13 Ziehstäbe im Schlift
- 14 Kühlfläche zur Entspannung des Glases
- 15 Überwachungskontrolle des Ofenbetriebes (Temperaturkontrolle mittels Pyrometer)

- 16 Abbrechen der automatisch abgeschnittenen Glastafel
- 17 Abbrechen großer Dickglastafeln
- 18 Kontrolle der Gladdicke
- 19 Auflagen einer Glastafel auf den Schneidisch
- 20 Auswertung der Tafel vor dem Zerschneiden
- 21 Schneiden von Streifen und Festmaßen
- 22 Schneiden großer Dickglastafeln auf Kippstischen
- 23 Sortieren der geschnittenen Tafeln
- 24 Schnittserben zum Wiedereinschmelzen
- 25 Verpacken in Holzkisten mit Stroh oder Holzwolle
- 26 Verladen in Waggons oder Lastwagen



Quelle: Thoma, L.: In einer Glashütte für Flach- und Fensterglas. In: Klöckner-Moeller Post 1955, S. 54 - 63, hier S. 55

B) Die Vorratslagerhaltung (Materialbewirtschaftung)¹⁾
der Glasfabrik unter Berücksichtigung der operations-
analytischen Lagerhaltungstheorie

Haben wir in unseren bisherigen Ausführungen die verschiedenen Theorien und Verfahren von Operations Research und deren allgemein mögliche Anwendung im Fertigungsbe-
reich aufgezeigt, so wollen wir im folgenden versuchen, diese Methoden an Hand betrieblicher Gegebenheiten der Glasfabrik darzustellen. Unser Vorgehen beschränkt sich dabei auf die Untersuchung sogenannter Routineprobleme, d.h. die Darstellung betrieblicher Situationen, die die Problemstrukturen bekannter und schon behandelter Operations-Research-Modelle erfüllen.²⁾

In den folgenden praktischen Beispielen können dabei natürlich nicht alle im theoretischen Teil behandelten Verfahren und Anwendungsmodelle Beachtung finden. Der Grund hierfür liegt einmal darin, daß die dort unterstellten Problemsituationen in der Fertigung der Glasfabrik nicht auftreten. So werden die Losdimensionierung (Losgröße, -sequenz und -folge), die Fließbandabstimmung und vor allem das "Zuordnungsproblem" der Fertigungsablaufplanung mit den damit verbundenen Detailplänen mangels adäquater Problemstrukturen keine praktische Durchführung finden. Dies gilt auch für die Beispiele der Termingrobplanung mit auftrags- und anlagenbezogener Terminplanung. Zum anderen sollen die Anwendungen von Beispielen mit sogenanntem Projektcharakter unberücksichtigt bleiben, z.B. die Planungsprobleme der "Wannenreparatur" mit Hilfe der Netzwerkanalyse nicht weiter unter-

1) Die Materialbewirtschaftung soll die Überwachung und Steuerung der Vorratslagerhaltung umfassen.

2) Den Gegensatz hierzu würde die Untersuchung eines Betriebsproblems durch Entwickeln und Lösen eines speziell darauf bezogenen Modells durch ein Operations-Research-Team bilden.

sucht werden, da solche Probleme grundsätzlich lösbar sind. Weiter müssen wir auf die Möglichkeiten der Computer-Simulation - mangels Vorhandenseins - verzichten und außerdem wollen wir den Theorien und Verfahren, die in praktischen Beispielen nur schwer oder überhaupt noch nicht Verwendung gefunden haben,¹⁾ keine Beachtung schenken.

Trotz dieser scheinbar weitgehenden Beschränkung wird aber - wie zu zeigen sein wird - für die Glasfabrik noch eine Vielzahl praktischer Probleme verbleiben, auf die Operations Research sinnvoll angewendet werden kann, ja, wir werden uns bei einzelnen allzu allgemeinen Problemstrukturen auf Literaturhinweise beschränken müssen.

I. Allgemeines

Das Lagerhaltungsproblem ist ein sehr altes Problem der Betriebswirtschaftslehre, das schon sehr frühzeitig Lehre und Praxis beschäftigt hat.²⁾ Die behandelten Probleme haben aber immer nur einen relativ kleinen Teil umfaßt und sind ohne Einbeziehung realistischer Prämissen und Interdependenzen gelöst worden, so daß trotz unbestritten richtiger mathematischer Behandlung die Lösung von ihren Grundvoraussetzungen aus umstritten geblieben ist.³⁾ Erst das Aufkommen neuer Verfahren (Operations

1) Wir denken hier vor allem an die nur in Spezialfällen lösbare "Nichtlineare Optimierung" sowie die verschiedenen Sonderfälle (Stochastische, Parametrische und Ganzzahlige Optimierung) der Mathematischen Programmierung und vor allem an die Spieltheorie.

2) Vgl. Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung ..., a.a.O., S. 50

3) Vgl. die ausführliche Behandlung der im Laufe der Entwicklung propagierten Formeln zum Bestellmengen- bzw. Losgrößenproblem bei Winkler, D.: Die kurzfristige ..., a.a.O., S. 26 - 59 sowie die Kritik dieser Ansätze (S. 60 - 62)

Research) und die Verbindung mit der elektronischen Datenverarbeitung führt zur Einführung realistischer Annahmen und zur intensiveren Bearbeitung einzelner Probleme¹⁾ aus dem großen Lagerhaltungskomplex (Rohstoff-, Halb- und Fertigwarenlager), auch in Verbindung mit der sogenannten Produktionsabstimmung (production smoothing)²⁾. Die Bedeutung der wissenschaftlichen Durchdringung der Materialbewirtschaftung wird allein aus der Tatsache ersichtlich, daß bei vielen Unternehmen beträchtliche Werte eingelagert sind³⁾ und die Lagerhaltungspolitik insgesamt nicht unwesentliche Konsequenzen für die gesamte Volkswirtschaft (Konjunktur) haben kann.⁴⁾

In den folgenden Ausführungen werden wir uns auf das Rohlager⁵⁾ der Glasfabrik beschränken, wobei wir alle

-
- 1) Vgl. die Ausführungen Gebhardt-Seele, P.: Rechenmodelle für wirtschaftliches Lagern und Einkaufen - Disposition mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. München - Wien 1962, S. 16 ff. mit einer Zusammenstellung aller bisher veröffentlichten Lagerhaltungsmodelle (S. 25)
Vgl. auch Hanssmann, F.: A Survey of Inventory Theory from the Operations Research Viewpoint. In: Ackoff, R. (Ed.): Progress in Operations Research. New York - London 1961, S. 65 - 104 sowie
Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations Research - Eine Einführung ..., a.a.O., S. 190 (Klassifikation der Lagerhaltungsprobleme)
 - 2) Vgl. Hanssmann, F.: Operations Research in Production ..., a.a.O., S. 113 - 126, S. 138/139 und
Magee, J.F.: Production Planning ..., a.a.O., S. 133 - 161
 - 3) Henzel schätzt, daß die Lagervorräte der deutschen Wirtschaft im Jahr 1962 ca. 80 - 90 Milliarden DM betragen haben. Vgl. Henzel, F.: Finanzierung und Lagerhaltung. In: ZfB 1962 (32), S. 560 - 575, hier S. 561/562
 - 4) Vgl. die zusammenfassenden Betrachtungen über die wirtschaftliche Bedeutung der Lagerhaltung bei Kaps, K.-H.: Die Bedeutung ..., a.a.O., S. 9 - 21 mit Statistiken
 - 5) Als Rohlager wollen wir alle Lager bezeichnen, in denen Bestände gelagert werden, die vom Beschaffungsmarkt zu beziehen sind. Vgl. Kaps, K.-H.: Die Bedeutung ..., a.a.O., S. 17

Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, die von der "Fertigung" regelmäßig und gleichmäßig benötigt werden, als einen Komplex betrachten und Materialien, die unregelmäßig gebraucht werden, als "sonstige Materialien" in einem zweiten Komplex zusammenfassen.¹⁾ Unterscheidungskriterium bildet die Regelmäßigkeit des Bedarfs. Diese Aufteilung soll die weiteren Modellbetrachtungen erleichtern.

Jede Lagerhaltungspolitik entscheidet über drei Größen:

- Kapitalbindung

- Kosten

- Lieferbereitschaft bzw. Produktionsbereitschaft, wobei keine dieser Größen für sich allein zu betrachten ist, sondern nur im allseitigen Zusammenhang. Die Ausführung dieser Lagerhaltungspolitik betrifft die Fragen

- des "Wieviel" in Auftrag zu geben ist,

- und des "Wann" der Auftragserteilung.²⁾

Ein wesentliches Kriterium für die Lösung der obigen Fragestellungen ist die Bestimmung des Bedarfs³⁾ bzw.

1) Die einzelnen Aufgaben der Materialbewirtschaftung wie Bestandsrechnung der Materialien, die Materialbeschaffung an sich, die Lagerverwaltung und Fragen der Kostenrechnung sollen nicht weiter untersucht werden.

2) Natürlich ließen sich die Überlegungen auch auf die Belieferung der Packerei durch die firmeneigene Kistenfabrik unter Zwischenschaltung eines Kistenlagers ausdehnen. Abzugrenzen ist aber vom Zwischenlager und vom Fertigwarenlager, die hier außerhalb der Betrachtung bleiben sollen.

3) Vgl. Winters, P.R.: Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages. In: Mgmt. Sci. 1960 (6), S. 324 - 342 und Vaterodt, A.H.: FORTRAN-Programm: Bedarfs- und Verkaufsvorhersage mit Hilfe der Exponential-Smoothing Methode. Univac: Mathematisch-Technische Verfahren. UVU-VMT, S. 8 - 66 sowie Schäfer, E.: Grundlagen der Marktforschung. 4. neu bearb. und erw. Aufl., Köln - Opladen 1966, S. 469 - 483.

des Lagerabgangs. In unserem Falle liegen die Verhältnisse relativ einfach, da der Bedarf und damit der Lagerabgang, sowohl der Rohstoffe, als auch der "sonstigen Materialien" weitgehend von der Produktion bestimmt wird. Dabei genügt es, von Durchschnittsvergangenheitswerten des Rohstoffverbrauchs auszugehen, wobei eine gleichbleibende Beschäftigung des "Wannenbetriebes" vorausgesetzt wird.¹⁾ Für den Bereich der "sonstigen Materialien" bedarf diese Überlegung - wie zu zeigen sein wird - noch gewisser Erweiterungen.²⁾

Die Bestimmung des "Wann" der Auftragserteilung ist abhängig von der Lagerorganisation, wobei man sich dreier verschiedener Bestellverfahren (Two-Bin-System, Constant-Cycling-System, s-S-Policy) bedient.

Das Meldemengensystem (Two-Bin-System) geht bei den einfacheren Modellen von einer fixen Bestellmenge aus, wobei eine Bestellmenge jedesmal dann abgegeben wird, wenn der Lagerbestand auf eine bestimmte vorgegebene Höhe s - Meldemenge genannt - absinkt. Man kann sich das Ganze plastisch in Form von zwei Behältern vorstellen, wobei ein leerer Behälter eine neue Bestellung auslöst, wäh-

3) Fortsetzung von Seite 209:

Die hier angegebene Literatur stellt nur einen kleinen Auszug aus den vielen Veröffentlichungen auf diesem Gebiet dar. Sie reichen zum Teil bis in die 20er Jahre zurück.

- 1) Ungewißheiten ergeben sich bezüglich des Lagerabgangs bzw. des Rohstoffverbrauchs durch die Nichtbeherrschung des Herstellungsprozesses. Bei "Sturz" - das Glasband stürzt in den Ziehschacht - und Abnutzung der Ziehdüse müssen einzelne Ziehmaschinen stillgelegt werden, was unmittelbare Auswirkungen auf den Rohstoff- und Energiebedarf hat. Die Reduzierung dieser "Betriebsrisiken" im Rohstoffbereich auf einwertige Größen in Form von Häufigkeitsziffern erscheint jederzeit möglich.

- 2) Vgl. Absatz IV dieses Kapitels B

rend der zweite im folgenden geleert wird.¹⁾

Beim "Constant-Cycling-System"²⁾ (zyklischen Lagerkontrollsystem) werden in jeweils gleichen Zeitabständen variable Mengen bestellt.

Die s-S-Lagerhaltungsregel³⁾ ist eine Kombination aus den beiden ersten Bestellverfahren. Dabei wird in einem bestimmten Bestellzyklus bestellt, aber nur dann, wenn wir unterhalb einer Bestellgrenze s angekommen sind und dann bis zu einem bestimmten Lagerbestand S . Dabei muß natürlich S und s so bestimmt werden, daß das ganze Lagerhaltungssystem optimal wird.⁴⁾

Unser zu lösendes Problem läßt sich in folgende praktische Fragestellung kleiden:

Die Glasfabrik benötigt innerhalb eines Planungszeitraumes T einen bestimmten bekannten Bedarf an Produktionsfaktoren U (z.B. verschiedene Rohstoffe). Dabei sind die bei der Beschaffung der Produktionsfaktoren pro Bestellung entstehenden Kosten F sowie die pro Faktoreinheit anfallenden Lagerkosten k . Die Beschaffungsmöglichkeit sei vorerst zeitlich und mengenmäßig unbegrenzt angenommen.

Zu entscheiden ist, in welchen Quantitäten bzw. wie oft und in welchen Abständen innerhalb der Planungszeiträume T Produktionsfaktoren zu beschaffen sind, wenn eine absolute Sicherung der Produktion gewährleistet und die

1) Vgl. Fletcher, A. - Clarke, G.: Mathematische ..., a.a.O., S. 106

2) Vgl. Fletcher, A. - Clarke, G.: Mathematische ..., a.a.O., S. 106

3) Vgl. Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung in Wirtschaft ..., a.a.O., S. 320

4) Vgl. Wagner, H.M.: Statistical Management of Inventory Systems. New York - London 1962, S. 31/32

Summe aus Beschaffungs- und Lagerkosten minimiert werden soll.

Gegenüber dem traditionellen Ansatz ist hier der Planungszeitraum explizit angeführt.¹⁾ Weitere Anpassungen an eine realistischere Betrachtung und Veränderungen gegenüber dem traditionellen Ansatz sollen in einem späteren Abschnitt dargestellt werden.

II. Modellbildung

Bevor wir uns der eigentlichen Modellbildung zuwenden, wollen wir noch eine kurze Erörterung des verwendeten Kostenkonzepts einschieben.

Grundsätzlich gibt es 5 Kostenarten, die bei der allgemeinen Lagerhaltungspolitik - nicht beschränkt auf Rohstofflager - beachtet werden sollten; d.h. allerdings nicht, daß sie innerhalb eines jeden Modellansatzes Verwendung finden.²⁾

- (1) Beschaffungskosten,
- (2) Lagerhaltungskosten,
- (3) Fehlbestandskosten,
- (4) Kosten, die durch Kundenanfragen entstehen,
- (5) Kosten der Datenbeschaffung und Lagerüberwachung.

Für unsere spezielle Modellbetrachtung - Rohstofflager - sind besonders die ersten drei Kostenarten von Interesse, wobei wir unter die Lagerhaltungskosten der Einfach-

1) Der Versuch, die Zeit mit in die Betrachtung einzubeziehen, ist im traditionellen Ansatz lediglich von Margoninsky, B.: Wirtschaftliche Lagerhaltung. München - Berlin 1933, S. 18 - 20, unternommen worden.

2) Im folgenden in Anlehnung an Hadley, G. - Whitin, T.M.: Analysis of Inventory Systems. Englewood Cliffs, N.J. 1963, S. 10 - 21

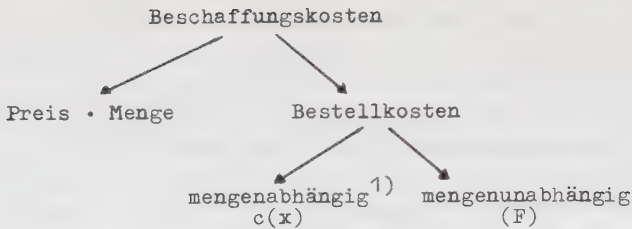
heit halber auch die Kosten der Datenbeschaffung und Lagerüberwachung subsumieren wollen. Diese drei Kostenarten sollen im folgenden einer kurzen Betrachtung unterzogen werden, was aber nicht ausschließen soll, daß nicht auch andere zusätzliche Kostenarten bedeutsam werden können. Einschränkend kann noch bemerkt werden, daß es für das praktische Beispiel unmöglich ist, alle Kostenkomponenten vollständig zu erfassen. In der Wirklichkeit wird man sich immer mit Annäherungen zufrieden geben müssen.

1. Beschaffungskosten

Die Beschaffungskosten setzen sich aus zwei Komponenten zusammen, nämlich Kosten, die sich als Einkaufspreis mal bezogene Menge ergeben und den sogenannten Bestellkosten. Dabei umfassen die Bestellkosten die Kosten für die Bearbeitung der Bedarfsmeldung (Computer-Kosten), der Angebotseinholung, der Bestellung (Arbeitszeit, Papier, Post, Telefon), des Wareneingangs, der Wareneingangsprüfung, der Einlagerung und unter Umständen des Transports.

Es zeigt sich, daß die Bestellkosten von der bezogenen Menge abhängig oder unabhängig sein können. So stenen Prüfkosten - soweit nicht nur Stichprobenprüfung - und Transportkosten zur Menge x in Abhängigkeit, erfüllen also die Funktion $c = c(x)$. Sie sollen den Einheitskosten (Preis $\cdot$ Menge) zugerechnet werden. Andererseits gibt es aber Bestellkosten (F), die von der Menge völlig unabhängig sind - etwa Angebotseinholung, Bestellung.

Die Beschaffungskosten ergeben sich insgesamt nach folgendem Schema



Die Bestimmung dieser Kosten im einzelnen ist meist recht schwierig, so daß man diese Kosten auch abzuschätzen versucht.²⁾

2. Lagerhaltungskosten

Die Lagerhaltungskosten werden im allgemeinen als Prozentsatz des durchschnittlichen Lagerwertes berechnet. Ob dieser Prozentsatz bei jedem Lagerumfang gleich ist oder ob er sich mit dem Lagerumfang ändert, ist im einzelnen sehr schwierig zu bestimmen und von Betrieb zu Betrieb verschieden. Folgende Faktoren sind bei der Berechnung des Lagerkostensatzes zu berücksichtigen:

- Zinsen des im Lager investierten Kapitals,
- Steuern,
- Versicherungskosten,
- Kosten der Lagerung und des Lagertransports,
- Veralterung, Verderben,
- allgemeine Lagerkosten.

1) Die mengenabhängigen Bestellkosten werden gewöhnlich den Stückkosten zugeschlagen.

2) Müller-Merbach gibt dafür Beträge von DM 30.-- bis DM 80.-- (Durchschnitt ca. DM 50.--) an. Vgl. Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen in der Einkaufs- und Fertigungsdisposition, Teil 1. In: ADL-Nachrichten 1965 (10), S. 626 - 654, hier S. 636

a) Zinsen

Die Berechnung des Zinssatzes kann auf verschiedenen Überlegungen basieren. Man kann nach dem Opportunitätskostenkonzept einen Zinssatz ansetzen, wie man ihn bei Investition in einem anderen Unternehmen oder in einem anderen Bereich des eigenen Unternehmens erwarten kann. Oder man orientiert sich am Bankzinssatz.

b) Steuern und Versicherungen

Die Steuern und die Versicherungen werden in der Regel als Prozentsatz des Lagerwertes ausgedrückt und sind im Lagerkostensatz zu berücksichtigen.

c) Kosten für Lagerung und Lagertransport

Aus den einzelnen Elementen der Lagerungskosten, wie

- Heizungskosten,
- Beleuchtungskosten,
- Reinigung,
- Materialtransport,
- Lagermiete bzw. Gebäudeabschreibung,
- Abschreibung Lagereinrichtungen,
- Reparaturen und Instandhaltungen,
- Lagerbuchführung,

sind für den Lagerkostensatz nur diejenigen zu berücksichtigen, die in Abhängigkeit zu dem im Lager investierten Kapital und damit indirekt zur gelagerten Menge stehen. Die reinen zeitabhängigen (fixen) Kosten bleiben unberücksichtigt. Ähnliches gilt für die Kosten von Bruch, Verderb, Veralterung, Schwund, Inventur und Überwachung.

3. Fehlmengenkosten

Als dritte interessante - aber schwer bestimmbare - Kostenkategorie haben wir die auf dem Opportunitätskosten-

konzept beruhenden sogenannten Fehlmengenkosten, die dadurch entstehen, daß durch eine Fehlmenge eine Nachfrage nicht erfüllt werden kann. Dabei lassen sich zwei Fälle unterscheiden: solche, bei denen die Aufträge bestehen bleiben (backorders) und solche, bei denen sie bei Nichterfüllung verloren gehen (lost sales). Auf diese für die weiteren Beispiele unwesentlichen Probleme soll aber nicht näher eingegangen werden.

Aus all diesen Kosten"ansätzen" werden für die verschiedenen Modellüberlegungen recht unterschiedliche Kostenteile verwendet,¹⁾ wobei man sich darüber klar sein muß, daß "significant differences between the cost concepts of accounting and the cost concept required by operations research will become apparent".^{2) 3)}

4. Darstellung des Grundmodells der Lagerhaltung

Der Lagerbestand in Abhängigkeit von der Zeit läßt sich graphisch folgendermaßen darstellen, woraus sich dann auch die anschließenden Berechnungen ableiten.

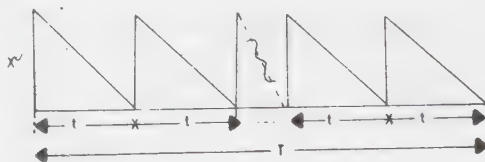


Abb.: Lagerbestand im Zeitablauf

-
- 1) Vgl. Gebhardt-Seele, P.: Rechenmodelle ..., a.a.O., S. 32 - 39
 - 2) Hanssmann, F.: Operations Research in Production ..., a.a.O., S. 78
 - 3) Hanssmann führt dazu weiter aus: "... for the purposes of operations research, at least two external 'quasi costs' categories must be added to the list of natural costs. Both are of the nature of opportunity costs." Hanssmann, F.: ebenda, S. 79

Es sei U der Gesamtbedarf des Planungszeitraumes T und x die gesuchte optimale Bestellmenge. Dann ergibt sich für den zeitlichen Abstand t zwischen zwei Bestellungen:

$$(1) \quad t = \frac{T \cdot x}{U}$$

Die weiteren Symbole bedeuten:

F = losfixe Kosten = Fixkosten pro Bestellung

c = proportionale Stückkosten = proportionale Beschaffungskosten

U = Bedarfsmenge im Planungszeitraum T

$\frac{p}{100}$ = Lagerkostensatz

Dann betragen die Gesamtkosten einer Bestellung $K_B = cx + F$ und die Lagerkosten bei Realisierung dieser Bestellmenge im Zeitraum t

$$(2) \quad K_L = \frac{x}{2} \cdot c \cdot \frac{p}{100} \cdot t$$

wobei angenommen wird, daß der durchschnittliche Lagerbestand im Zeitraum t $\frac{x}{2}$ beträgt.

Die Gesamtkosten K für den Planungszeitraum T betragen dann:

$$(3) \quad K = \left(\frac{x}{2} \cdot c \cdot \frac{p}{100} \cdot t + cx + F \right) \cdot \frac{U}{x}$$

oder nach Einsetzen von t

$$(3a) \quad K = \frac{x}{2} \cdot \frac{cpT}{100} + \frac{F \cdot U}{x} + c \cdot U$$

Nach Differentiation, Nullsetzen der 1. Ableitung und Auflösen nach x erhalten wir

$$(4) \quad x = \sqrt{\frac{200 \cdot F \cdot U}{c \cdot p \cdot T}}$$

Für $T = 1$ ergibt sich Übereinstimmung mit früheren traditionellen Ansätzen, d.h. diese stellen einen Spezialfall des heutigen Ansatzes dar.

Die optimalen - sprich minimalen - Gesamtkosten ergeben sich, wenn wir (4) in (3a) einsetzen und umwandeln

$$(5) \quad k_0 = \frac{1}{10} \sqrt{2 \cdot F \cdot U \cdot T \cdot c \cdot p + c \cdot U}$$

und der optimale Bestellabstand, wenn wir (4) in (1) einsetzen

$$(6) \quad t_0 = \sqrt{\frac{200 \cdot F \cdot T}{c \cdot p \cdot U}}$$

11. Die ABC-Analyse als Kriterium des Einsatzes der Bestellmengenformel

Die vorangehenden Überlegungen über die benötigten Daten bei der Anwendung der Bestellmengenformel haben gezeigt, daß es im praktischen Einzelfall erheblicher Aufwendungen bedarf, um diese Daten für das einzelne Lagermaterial zu erhalten. Bedenkt man nun die überaus große Zahl von einzelnen Lagermaterialien, so wirft sich die Frage auf, ob sich dieser Aufwand der Datenbeschaffung bzw. einer besonderen Lagerüberwachung bei den oft in die Pausen gehenden Einzelteilen auch lohnt, oder ob es nicht so ist, daß eventuelle Kostenersparnisse durch optimale Bestellmengen von den dafür notwendigen Kosten der Datenbeschaffung bzw. Lagerbewirtschaftung mehr als kompensiert werden. Man sollte also die wissenschaftlichen Methoden immer nur dort anwenden, wo sie den größten Vorteil bringen und niemals über den Punkt: Entstehender "Grenzertrag" ist kleiner als anfallende "Grenzkosten", hinaus. Die Konzentrierung auf die hochwertigen Lagermaterialien erleichtert uns die sogenannte ABC-Analyse, die uns einen Maßstab dafür gibt, welche Bedeutung jeder einzelne Lagergegenstand für die Wirtschaftlichkeit der Lagerhaltung hat.¹⁾ Die ABC-Analyse beruht

1) Vgl. Dickie, H.F.: ABC Inventory Analysis Shoots for Dollars, not Pennies. In: Factory Management and Maintenance 1951 (109), No. 7, S. 92 - 94

dabei auf der von Statistikern entdeckten Tatsache, daß bei einem Lager

eine zahlenmäßig kleine Gruppe von Lagermaterialien den größten Teil des Bestandswertes bindet, während zahlreiche, aber billige Lagerstücke nur einen geringen Bestandswert darstellen.¹⁾

Dies ist in einer Kurve dargestellt worden, die die prozentualen Anteile des gesamten Lagerbestandswertes in Abhängigkeit von den wechselnden prozentualen Anteilen der auf Lager gehaltenen Anzahl verschiedener Gegenstände (Rohstoffe) wiedergibt, wobei z.B.

A - Teile mit 75 % des Lagerumsatzes,

B - Teile mit 20 % des Lagerumsatzes und

C - Teile mit 5 % des Lagerumsatzes

angenommen werden können.

Die A - Teile machen aber nur, wie es nachfolgende Kurve wiedergibt, 8 % der verschiedenen Lagergegenstände aus, die B - Teile 25 % und die C - Teile 67 %.

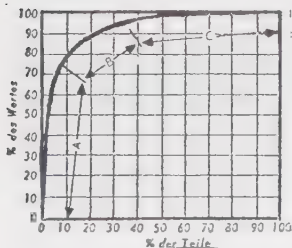


Abb.: Prozentuale Anteile des gesamten Lagerbestandswertes in Abhängigkeit von den wechselnden prozentualen Anteilen der auf Lager gehaltenen Anzahl verschiedener Gegenstände.²⁾

(Quelle: Vgl. Fußnote 1)

1) Vgl. Neuschel, R.F.: Lagerwirtschaft. In: Handbuch des Industrial Engineering - Gestaltung, Planung und Steuerung industrieller Arbeit. Hrsg.: Maynard, H.B. Dt.: Krüger, K., Teil IV, Berlin - Köln - Frankfurt/M. 1956, S. 97 - 141, hier S. 120/121

2) Vgl. ebenda, S. 121

Die Verteilung der Werte und Gegenstände wird natürlich bei jedem Unternehmen verschieden sein, doch wird nur im Spezialfall eine Annäherung an obige Kurve nicht erfolgen.¹⁾

Als Folgerung aus obigem Phänomen ergibt sich eine Konzentration der Materialbewirtschaftung²⁾ auf A - und unter Umständen B - Teile, während die C - Teile hierbei weitgehend unberücksichtigt bleiben; als Bestelltendenz A - Teile möglichst oft, B - Teile weniger oft und C - Teile selten zu bestellen.

III. Erweiterungen des Grundmodells³⁾

1. Zulassung von Fehlmengen

Die Lagerhaltungspolitik für Rohstoffe schließt das Zulassen von sogenannten Fehlmengen völlig aus, da dieser

-
- 1) Die Berechnung der Kurve geht folgendermaßen vor sich: Man stellt für jede(n) auf Lager gehaltene(n) Position (Gegenstand) fest:

- Preis oder Kosten je Einheit (Stück, kg, t, m² ...) je Position
- jährlicher Verbrauch je Position. Der Verbrauch kann aufgrund statistischer Unterlagen (Vergangenheits- oder Plandaten) festgelegt werden.

Nun werden Preis oder Kosten je Einheit je Position (Gegenstand) mit dem jährlichen Verbrauch je Position multipliziert und wir erhalten den wertmäßigen Jahresumsatz je Position. Die addierten Jahres-Umsatzwerte aller Positionen bilden die Bezugsbasis zur Berechnung des prozentualen Anteils jeder Position am Gesamtumsatz. Dann werden alle Positionen in steigender (bzw. fallender) Reihenfolge angeordnet und anschließend ins Diagramm übertragen.

- 2) Unter wissenschaftlicher Materialbewirtschaftung wollen wir die Anwendung der Bestellmengen- und Bestellzeitformel, die Bestimmung der Sicherheitslager bei den verschiedenen Bestellverfahren unter Berücksichtigung der Ergebnisse der ABC-Analyse und der noch zu beschreibenden Erweiterungen des Grundmodells verstehen.
- 3) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations Research ..., a.a.O., S. 194 - 196

Zustand eine Unterbrechung der Glasproduktion mit vernichtenden Folgen nach sich ziehen würde. Für das weniger wichtige "sonstige Lagerhaltungsmaterial" soll aber die Möglichkeit von Fehlmengen in Einzelfällen gestattet werden, so daß sich hierbei die Frage ergibt, ob die vollständige Deckung des Bedarfs durch Lagerbestände oder die Zulassung von gewissen Fehlmengen kostengünstiger ist.

Die Zulassung von Fehlmengen bedeutet, daß zwar die optimale Bestellmenge x berechnet werden kann, daß aber eine kleinere Menge s realisiert wird. Bei unveränderter Produktionsgeschwindigkeit hat dies ein Leerlaufen des Lagers nach einer gewissen Zeit t_1 ($t_1 < t$) zur Folge, so daß sich in der Zeit $t_2 = t - t_1$ sogenannte Fehlmengen und auf die Zeit und Menge bezogene Fehlmengenkosten C ergeben, die als bekannt angenommen werden.¹⁾ (Siehe dazu die folgende Abbildung)

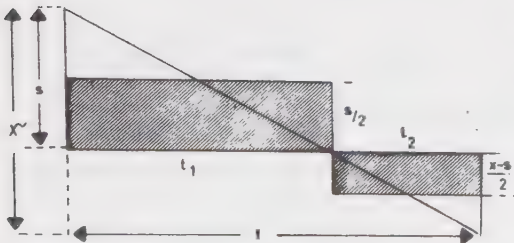


Abb.:
Fehlmengen-
darstellung

Quelle: Church-
man, C.W. -
Ackoff, R.L. -
Arnoff, E.L.:
Operations Re-
search ...,
a.a.O., S. 205
(Zeichen verän-
dert)

Es sei $\frac{s}{2}$ der durchschnittliche Bestand während t_1 und $\frac{x-s}{2}$ die durchschnittliche Fehlmenge während t_2 .

1) Hierbei ergeben sich kritische Einwendungen, denn in einem Großteil der Fälle werden diese Kosten nicht ohne weiteres bestimmbar sein. Es wirft sich weiterhin die Frage auf, ob sich der dazu nötige Aufwand zu deren Bestimmung letztlich auch lohnt.

Es entstehen während t_1 Lagerkosten K_L von

$$(7) \quad K_L = \frac{c \cdot p}{100} \cdot \frac{s}{2} \cdot t_1$$

und während t_2 Fehlmengenkosten K_{FM} in Höhe von

$$(8) \quad K_{FM} = c \cdot t_2 \cdot \frac{x - s}{2}$$

Die Gesamtkosten für den Planungszeitraum T betragen dann wegen $T = \frac{U \cdot t}{x}$

$$(9) \quad K = \left[F + cx + cs t_1 \cdot \frac{p}{200} + c \cdot t_2 \left(\frac{x - s}{2} \right) \right] \cdot \frac{U}{x}$$

Aus Abb. Fehlmengendarstellung folgt

$$s : t_1 = x : t;$$

$$(10) \quad t_1 = \frac{s \cdot t}{x}$$

und $t_1 : s = t_2 : (x - s); t_2 = \frac{(x - s) \cdot t_1}{s}$ oder

$$(11) \quad t_2 = \frac{(x - s) \cdot t}{x}$$

(10) und (11) in (9) eingesetzt ergeben:

$$(12) \quad K = \left[F + cx + cs \cdot \frac{s \cdot t}{x} \cdot \frac{p}{200} + c \cdot \frac{(x - s)t}{x} \cdot \frac{(x - s)}{2} \right] \frac{U}{x}$$

und mittels (1)

$$K = \left[F + cx + cs^2 \cdot \frac{Tx \cdot p}{U \cdot 200x} + c \cdot \frac{(x - s)^2}{2} \cdot \frac{T \cdot x}{U} \right] \frac{U}{x}$$

$$(13) \quad K(x, s) = cU + \frac{FU}{x} + \frac{cs^2 Tp}{200x} + \frac{CT(x - s)^2}{2x}$$

Gleichung (13) stellt die Gesamtkosten für den Zeitraum T als Funktion der Variablen x und s dar.

Die partiellen Ableitungen aus (13) $\frac{\partial K}{\partial x}$ und $\frac{\partial K}{\partial s}$ werden 0 gesetzt.

$$\frac{\partial K}{\partial x} = -\frac{FU}{x^2} - \frac{cs^2 \cdot T \cdot p}{200x^2} + CT \cdot \frac{2(x^2 - s^2)}{4x^2}; \quad \frac{\partial K}{\partial s} = 0$$

$$\frac{\partial K}{\partial s} = \frac{2Tp}{200x} - \frac{CT}{2x} \cdot 2(x - s); \quad \frac{\partial K}{\partial s} = 0$$

daraus folgt:

$$(14) \quad 100 Cx^2 - 100 Cs^2 - cps^2 - 200 \frac{F \cdot U}{T} = 0$$

$$(15) \quad 100 Cs - 100 Cx + cps = 0$$

und aus (15)

$$s = \frac{+ 100 Cx}{100 C + cp} \quad \text{oder}$$

$$(16) \quad s = Ax \quad \text{wobei} \quad A = \frac{100 C}{100 C + cp} = \frac{C}{C + \frac{cp}{100}} ;$$

Durch Einsetzen von (16) in (14) ergibt sich

$$(17) \quad x_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{200 \cdot F \cdot U}{T [100 C - A^2 \cdot (100 C + cp)]}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\frac{200 FU}{T_{cp}}}$$

und damit aus (16)

$$(18) \quad s_{\text{opt}} = A \cdot x_{\text{opt}} = \sqrt{A} \cdot \sqrt{\frac{200 FU}{T \cdot c \cdot p}}$$

Aus (1) bestimmen wir

$$(19) \quad t_{\text{opt}} = \frac{T}{U} x_{\text{opt}} = \frac{1}{\sqrt{A}} \cdot \sqrt{\frac{200 F \cdot T}{U_{cp}}}$$

Die minimalen Gesamtkosten ergeben sich durch Einsetzen von (17) und (18) in (13):

$$(20) \quad K_{\text{Min}} = cU + \frac{1}{10} \sqrt{2F \cdot U \cdot T \cdot c \cdot p} \cdot \sqrt{A}$$

Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Grundmodells zeigt, daß sich die dort gefundenen Beziehungen nur durch die Größe $\sqrt{A}$ bzw. $\sqrt{\frac{1}{A}}$ unterscheiden.

Es läßt sich unschwer beweisen, daß, wenn $C \rightarrow \infty$ geht, s_{opt} gegen x_{opt} strebt. Das dargelegte Grundmodell stellt also wiederum einen Spezialfall eines allgemeineren Modells dar, bei dem die Fehlmengenkosten als gegen unendlich gehend nicht gestattet worden sind.

2. Die Berücksichtigung der Beschaffungszeit

In unseren bisherigen Modellbetrachtungen sind wir von einer unendlich großen Beschaffungsgeschwindigkeit, d.h. der Beschaffungszeit 0, ausgegangen. Nun entspricht dies aber keinesfalls der betrieblichen Wirklichkeit. Daher wollen wir die Beschaffungszeit als zusätzliche Erweiterung einführen. Wir können bei der Glasfabrik von der realistischen Annahme ausgehen, daß der Bestellzeitraum im Vergleich zur Beschaffungszeit relativ groß ist. Unterstellen wir weiter eine, sich aus Vergangenheitswerten ergebende, durchschnittliche Beschaffungszeit,¹⁾ so gilt es den Bestellzeitpunkt so zu wählen, daß der Lagerabgang (Verbrauch) während des Beschaffungszeitraumes nicht größer ist als die vorhandenen Lagermengen. Die Berechnung des sogenannten eisernen Bestandes²⁾ erfolgt nach der Formel:

$$\text{Beschaffungszeit } [ZE] \cdot \text{Bedarf}/ZE \left[\frac{to}{ZE} \right]$$

Diese Überlegungen befriedigen keinesfalls, da sowohl der Bedarf als auch die Beschaffungszeit als bekannt und konstant vorausgesetzt werden. Läßt sich die Annahme eines genau bekannten Bedarfs für den Rohstoffbereich der Glasfabrik noch akzeptieren, so unterliegt zumindest die Beschaffungszeit realistischerweise einer gewissen Schwankungsbreite, die im Einzelfall durch die vergangenheitsorientierten Durchschnittswerte nur unzureichend

1) Als Beschaffungszeit ist die Zeitspanne zu verstehen, die vom Zeitpunkt der Aufgabe einer Bestellung bis zum Zeitpunkt des Eintreffens der fraglichen Werkstoffmenge im Betrieb verstreicht. Sie setzt sich aus 4 Teilzeiten zusammen, und zwar (a) Bestellzeit, (b) Lieferzeit, (c) Transportzeit und (d) einem Sicherheitszuschlag.

Vgl. Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 45

2) Vgl. hierzu auch Nicklisch, H.: Die Betriebswirtschaft, 7. Aufl., Stuttgart 1932, S. 452/453

wiedergegeben wird.¹⁾ Zur Vermeidung von Fehlmengen bedarf es deshalb der Berechnung eines Sicherheitslagers, wobei es letztlich gleichgültig ist, ob die Unsicherheit durch eine schwankende Beschaffungszeit oder einen stochastischen Bedarf verursacht wird. Auf diesen Fall soll aber in einem folgenden Kapitel gesondert eingegangen werden.

Schwieriger liegen die Verhältnisse, wenn etwa tägliche Lieferungen erforderlich sind, die Beschaffungszeit aber relativ lang und außerdem noch der Bedarf zwar bekannt, aber schwankend ist. Die Lösung eines solchen Problems wird von CHURCHMAN, ACKOFF, ARNOFF²⁾ angeführt; die Wirklichkeit innerhalb der Glasfabrik zeigt keine solche Problemsituation, weshalb auf eine ausführlichere Beschreibung verzichtet werden soll.

3. Die Annahme mengenabhängiger Preise und zukünftiger Preiserhöhungen

Für den im allgemeinen realistischen Fall von mengenabhängigen Einkaufspreisen lassen sich zwei verschiedene Variationen unterscheiden.³⁾ Einmal der Fall, daß mit steigenden Bestellmengen kontinuierlich fallende "Preise" zu zahlen sind und zum anderen diskontinuierlich fallende Preise angenommen werden.

Der erste Fall kommt durch die Annahme zustande, daß bei jedem Kauf neben dem gleichbleibenden Preis c auch noch

-
- 1) Ziegler führt hierbei noch einen Sicherheitsfaktor ein, der eine Fehlmenge verhindern soll. Vgl. Ziegler, H.: Die Lagerverwaltung im Fabrikbetrieb. Diss. Mannheim 1934, S. 56
 - 2) Churchman, C.W. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations ..., a.a.O., S. 203 - 205
 - 3) Vgl. Whitin, Th.M.: The Theory of Inventory Management. 2nd ed., Princeton, N.J. 1957, S. 34

ein bestimmter Fixkostenbetrag Q zu zahlen ist, und zwar unabhängig von den fixen Beschaffungskosten. Dies ergibt bei steigenden Mengen einen kontinuierlich fallenden Stückpreis und letztlich eine verstärkt auftretende Kostendegression, was zu einem Anwachsen der optimalen Bestellmenge führt.

Das zweite Problem zeigt das Auftreten von Mengenrabatten (r), deren Inanspruchnahme u.U. die optimale Bestellmenge verschieben kann. Die Lösung erhalten wir mit Hilfe eines Vergleiches der Gesamtkostengleichungen für K_{opt} und K_r . Dabei unterstellen wir ab einer bestimmten Menge x_r einen Rabatt von r .¹⁾

Verwenden wir die vereinfachte Gesamtkostengleichung ohne explizite Einbeziehung des Planungszeitraumes,²⁾ so ergibt sich allgemein

$$(3b) \quad K = c \cdot U + \frac{x_{cp}}{2 \cdot 100} + \frac{FU}{x}$$

$$\text{und für } K_r = U \cdot c \left(1 - \frac{r}{100}\right) + \frac{x_r pc}{200} \left(1 - \frac{r}{10}\right) + \frac{FU}{x_r}$$

$$K_{opt} = UC + \frac{x_{opt} pc}{200} + \frac{FU}{x_{opt}}$$

$$\text{Setzen wir } \Delta K = K_{opt} - K_r$$

so erhalten wir nach etlichen Umformungen und Eliminierung von UF

$$(21) \quad \Delta K = \frac{Ucr}{100} - \frac{pc}{200} x_{opt} \left(\frac{x_{opt}}{x_r} - 2 + \frac{x_r}{x_{opt}}\right)$$

wenn $\Delta K > 0$ so ist auch

$$(21a) \quad Ur > \frac{pc}{2} x_{opt} \cdot \left(\frac{x_{opt}}{x_r} - 2 + \frac{x_r}{x_{opt}}\right)$$

1) Es sind natürlich ähnliche Überlegungen bei tiefer gestaffelten Mengenrabatten möglich. Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations ..., a.a.O., S. 228 - 233, besonders S. 233

2) Wir setzen $T = 1$ in (3a) ein.

Daraus lassen sich folgende Regeln ableiten:¹⁾

- (1) Man berechnet mit Hilfe von (4) die optimale Bestellmenge auf der Basis reduzierter Preise c_2 , wobei gilt $c_1 > c_2$. Ist $x_2 \geq x_r$, so ist die optimale Bestellmenge x_2 , da der niedrigere Preis ausgenutzt werden kann; ein weiteres Problem tritt nicht auf.
- (2) Ist jedoch $x_2 < x_r$, so muß auch x_1 mit c_1 berechnet werden. Hierbei ist nun zu prüfen, ob nicht der durch den Bezug einer Menge $x \geq b$ erzielbare Preisvorteil die auch damit verbundenen höheren Lagerkosten übersteigt. Diese Entscheidung fällt aufgrund eines Kostenvergleichs, bei dem die Gesamtkosten K_{1opt} mit den K_r verglichen werden. Ist das K_{1opt} kleiner als das vergleichbare K_r mit niedrigem c_2 , so wählt man x_1 ; ist $K_{1opt} > K_r$, so wählt man x_r .

Der Fall zukünftiger Preisschwankungen - speziell von Preiserhöhungen - ist ebenfalls von Whitin²⁾ erörtert worden. Folgende Gesichtspunkte sind dabei abzuwägen:

- (a) Ersparnisse können dadurch erzielt werden, daß vor der Preiserhöhung mehr als die optimale Bestellmenge auf Lager genommen wird;
- (b) bei gleichbleibendem Absatz sind durch die erhöhte Bestellung insgesamt weniger Bestellmengen pro Zeitraum erforderlich und damit treten geringere Gesamtbestellkosten auf.
- (c) Obigen Ersparungstendenzen einer erhöhten Bestellmenge sind die steigenden Lagerbestände und die damit verbundenen Kostenerhöhungen entgegenzustellen.

Das Abwägen dieser Argumente ist von Whitin mit folgender Formel berücksichtigt worden:³⁾

1) Vgl. Whitin, Th.M.: The Theory ..., a.a.O., S. 35/36

2) Vgl. Whitin, Th.M.: The Theory ..., a.a.O., S.38 - 42

3) Vgl. Whitin, Th.M.: The Theory ..., a.a.O., S. 41.
Diese Formel wurde umgeformt und auf unsere Symbole umgeschrieben.

$$(22) \quad x_2 = \frac{100 \cdot U}{(1 + a) \cdot p} + \frac{x_1}{a}$$

wobei bedeutet:

x_1 die aufgrund der alten Preisverhältnisse errechnete optimale Losgröße

a die Preisvariation: Neuer Preis zu alter Preis;
 a immer > 1

x_2 die unter Berücksichtigung der veränderten Preisverhältnisse optimale Losgröße.

Ähnliche Überlegungen sind von KNAYER¹⁾ und FERSCHL²⁾ durchgeführt worden.³⁾

4. Die Berücksichtigung von Nebenbedingungen

Bei der Lagerhaltung kann es vorkommen, daß Betriebsmittel bzw. sonstige Gegebenheiten nur in beschränktem Maße zur Verfügung stehen.⁴⁾ Solche kurzfristigen Engpässe können u.a. durch beschränkte Lagermöglichkeiten, Restriktionen im Finanzbereich und eine absolut begrenzte Anzahl von Bestellungen gegeben sein.

Betrachten wir zuerst den Fall des begrenzten Lagerraumes. Nehmen wir an, daß eine Einheit j einen Raumbedarf w_j hat, so gilt für die verschiedenen Bestellungen n

$$(23) \quad \sum_{j=1}^n w_j x_j = w_1 x_1 + w_2 x_2 + \dots + w_n x_n \leq S$$

1) Vgl. Knayer, M.: Optimale Einkaufsmenge bei Preiserhöhungen. In: Ablauf- und Planungsforschung 1961 (2), S. 47 - 50

2) Vgl. Fersch, F.: Zum Problem der optimalen Zusatzbestellung. In: Ufo 1961 (5), S. 121 - 131

3) Vgl. Müller-Merbach, H.: Optimale Einkaufsmengen. In: Ablauf- und Planungsforschung 1963 (8), S. 226 - 237

4) Vgl. Hadley, G. - Whitin, Th.M.: Analysis of Inventory Systems. Englewood Cliffs, N.J. 1963, S. 54 - 59

wobei S den verfügbaren Raum¹⁾ darstellt. Hierbei wird die Möglichkeit nicht berücksichtigt, durch geschickte zeitliche Staffelung einen geringeren Raumbedarf zu benötigen.

In Verbindung mit der Gesamtkostengleichung (3a) soll nun das Kostenminimum innerhalb der Grenzen

$$0 < x_j < \infty$$

gefunden werden, das auch den Beschränkungen (23) genügt.

Erfüllen die mit (4)

$$x_j = \sqrt{\frac{200 \cdot F \cdot U}{c \cdot p \cdot T}}$$

erhaltenen Ergebnisse die Beschränkungen (23), so ergibt dies schon die Lösung. Erst wenn die mit (4) gewonnenen Ergebnisse die Beschränkung (23) überschreiten, bedarf es einer weiteren Rechnung, die auf der vereinfachten Verwendung Lagrange'scher Multiplikatoren beruht und zuerst von BECKMANN angewandt worden ist.²⁾

Hierbei wird eine Größe λ so definiert, daß

$$\lambda < 0 \text{ wenn } S - \sum_{j=1}^n w_j x_j = 0$$

$$\lambda = 0 \text{ wenn } S - \sum_{j=1}^n w_j x_j > 0, \text{ so daß gilt}$$

$$\lambda \cdot (S - \sum w_j x_j) = 0$$

1) Dabei kann man, je nach Lagermöglichkeit, von einer Quadrat- oder Kubikmeterbetrachtung des Lagerraumes ausgehen. Weiter sind die Fälle zu berücksichtigen, bei denen der Raum durch Gänge oder beschränkte Baulichkeiten nicht voll ausgenutzt werden kann sowie die Lagerung in Tanks und Behältern mit immer gleichem Raumbedarf.

2) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 239 - 244

Diesen Ausdruck addieren wir zur Gesamtkostengleichung (3a), ohne daß sich dadurch der Wert von K verändert.

$$K = cU + \frac{x_{cp}}{200} T + \frac{FU}{x_j} + \lambda \left(S - \sum_{j=1}^n w_j x_j \right)$$

Die partielle Ableitung $\frac{\partial K}{\partial x_j}$ ergibt dann nach $\frac{\partial K}{\partial x_j} = 0$ einen Wert für

$$(24) \quad x_j^* = \frac{2 FU}{\frac{cp}{100} T - 2 \lambda w_j} \quad 1)$$

Wir können nun λ solange einen willkürlichen Wert annehmen lassen, bis sich ein x_j^* , das die Bedingung

$$(23) \quad \sum_{j=1}^n w_j x_j \leq S \text{ erfüllt,} \quad 2) \text{ bildet.}$$

Der Unterschied zwischen K_{opt} und K_j^* wird mit Hilfe der sogenannten Sensibilitätsanalyse sowohl absolut als auch relativ bestimmt.³⁾ Weiter interessiert die Frage, ob es günstiger ist, die durch die beschränkte Lagerkapazität bedingte Kostenerhöhung in Kauf zu nehmen oder die ursprünglich optimale Bestellmenge beizubehalten und den fehlenden Lagerraum zu mieten bzw. zu erstellen.

Zur Lösung dieser Frage legen wir folgende Annahmen zugrunde:

Der vorhandene Lagerraum S kostet M DM/Raumeinheit. Die gesamten Lagerraumkosten betragen dann $M \cdot \sum w_i x_i$. Diesen Ausdruck addieren wir zur Gesamtkostengleichung (3a),

1) Die partielle Ableitung ist nach Churchman, Ackoff, Arnoff durchgeführt worden: Hadley-Whitin erhalten eine etwas andere Formel, da direkt mit Lagrang'schen Multiplikatoren gearbeitet wird.

2) Müller-Merbach hat hierzu ein Iterationsverfahren entwickelt.

3) Vgl. Müller-Merbach, H.: Sensibilitätsanalyse der Losgrößenbestimmung. In: Ufo 1962 (6), S. 79 - 88

differenzieren, setzen die differenzierte Gleichung gleich Null und erhalten

$$(25) \quad x_i^* = \sqrt{\frac{2 \text{ FU}}{\frac{p}{100} cT + 2M_{wi}}}$$

Der Vergleich von (25) und (24) zeigt, daß $-\lambda = M$ ist, den Kosten des knappen Lagerraumes. Hieraus läßt sich die günstige Entscheidung ableiten, wobei $-\lambda$ bei (24) den "sogenannten Schattenpreis" für den verfügbaren Lagerraum wiedergibt. Liegt der Mietpreis oder liegen die Herstellkosten für zusätzlichen Lagerraum unter λ pro Raumeinheit und Zeitraum, so lohnt sich der Bau oder die Miete.

Die Nebenbedingung der Beschränkung auf eine bestimmte Anzahl von Bestellungen hat unseres Erachtens wenig Praxisbezogenheit und soll daher nicht weiter ausgeführt werden.¹⁾

Mehr Beachtung verdient dagegen die Bedingung, daß das ins Lager investierte Kapital nur eine bestimmte Höhe erreichen soll. Diese Beschränkung fordert, daß

$$(26) \quad \sum_{j=1}^n c_j x_j \leq D \text{ gilt.}$$

Die Gesamtkostengleichung (3b) soll unter der Bedingung (26) minimiert werden:

$$(27) \quad K = \sum_{j=1}^n \left[\frac{F_j U_j}{x_j} + c_j U_j + \frac{x_j c_j p}{200} T \right] + \eta \left(\sum_{j=1}^n c_j x_j - D \right)$$

η ist dabei der Lagrange'sche Multiplikator. Dann muß die optimale Menge x_j die Gleichungen

$$(27a) \quad \frac{\partial K}{\partial x_j} = 0 = \frac{F_j U_j}{x_j^2} + \frac{c_j p T}{200} + \eta c_j; \quad j = 1 \dots n$$

1) Vgl. dazu die Durchführung bei Hadley, G. - Whitin, Th.M.: Analysis ..., a.a.O., S. 56/57

$$(27b) \frac{\partial K}{\partial \eta} = 0 = \sum_{j=1}^n c_j \dot{x}_j - D \text{ erfüllen.}$$

Die einzige optimale Lösung ist dann durch

$$(27c) x_j^* = \sqrt{\frac{2 F_j U_j}{c_j \frac{pT}{100} + 2 \eta^* c_j}} = \sqrt{\frac{2 F_j U_j}{c_j (\frac{pT}{100} + 2 \eta^*)}}; j = 1 \dots n$$

gegeben.

Setzen wir $T = 1$, so erhalten wir

$$x_j^* = \sqrt{\frac{2 F_j U_j}{c_j (\frac{p}{100} + 2 \eta^*)}}.$$

Die eben gemachten Ausführungen seien an Hand eines einfachen Beispiels - der formale Rechengang gilt auch für eine Berechnung bei Raumbeschränkungen - deutlich gemacht.

Beispiel:¹⁾

Betrachten wir die Glasfabrik, die drei verschiedene Produkte (Rohstoffe) bestellt und dabei nie mehr als DM 14.000,-- im Lager investieren will. Die Nachfrage kann unter den gegebenen Bedingungen als konstant und bestimmt angenommen werden. Der Lagerkostensatz beträgt $p = 20$. Es gelten die folgenden weiteren Daten. Die optimalen Bestellgrößen sind zu ermitteln.

Produkt	1	2	3
Nachfrage U	1000	500	2000
Variable Kosten c	20	100	50
Bestellkosten F	50	75	100

1) Das Beispiel ist unter Zugrundelegung der Ausführungen von Hadley, G. - Whitin, Th.M.: Analysis ..., a.a.O., S. 59/60 und ohne bestimmte kostenmäßige Bezugnahme auf die Glasfabrik konzipiert.

Die optimalen Bestellgrößen ohne die Beschränkung wären

$$x_j = \sqrt{\frac{200 \text{ FU}}{c_j T}}$$

$$x_1 = \sqrt{\frac{200 \cdot 50 \cdot 1000}{20 \cdot 20 \cdot 1}} = 158;$$

$$x_2 = \sqrt{\frac{200 \cdot 500 \cdot 75}{100 \cdot 20}} = 61;$$

$$x_3 = \sqrt{\frac{200 \cdot 2000 \cdot 100}{20 \cdot 50}} = 200.$$

Wenn wir diese Mengen bestellen, so beträgt die damit verbundene Lagerinvestition:

$$D = 20 \cdot 158 + 100 \cdot 61 + 200 \cdot 50 = 19.260,-- \text{ DM}$$

Das ist weit größer, als die maximal erlaubte Lagerinvestition; somit ist die Beschränkung überschritten und wir können die Formel (27c) anwenden, wobei η^* die Lösung der Gleichung

$$14\ 000 = \sum_{j=1}^3 \sqrt{\frac{2 F_j U_j}{c_j \left(\frac{p}{100} + 2\right)}} \cdot c_j \text{ ist.}$$

η^* errechnet sich mit 0,09.

Folglich bestimmen sich die optimalen x_j nach

$$x_j^* = \sqrt{\frac{2 F_j U_j}{c_j \left(\frac{p}{100} + 2\eta^*\right)}}; \quad \begin{array}{l} x_1 = 114 \\ x_2 = 44 \\ x_3 = 145 \end{array}$$

wobei die Beschränkung von D mit

$$114 \cdot 20 + 44 \cdot 100 + 145 \cdot 50 = 13\ 930 \text{ erfüllt ist.}$$

IV. Die Bestimmung der Meldemenge innerhalb der Lagerhaltung der Glasfabrik

Haben wir bisher der formelmäßigen Mengen- und Zeitbestimmung mit den verschiedensten Erweiterungen unsere Aufmerksamkeit geschenkt, so wollen wir nun, mehr unter dem Gesichtspunkt der Lagerorganisation, ein Zahlenbeispiel betrachten.

Wie wir früher schon ausgeführt haben, unterscheiden wir drei Lagerorganisationssysteme (Meldemengensystem, Constant Cycling-System, s-S-Policy). Sie bezeichnen im wesentlichen die Art der Lagerüberwachung mit der Auslösung der Bestellung, weshalb man oft auch von Bestellverfahren spricht. Aus der Sicht der Glasfabrik ist besonders das sogenannte Meldemengensystem¹⁾ - auch Two-Bin-System genannt - von Interesse, obwohl sich das s-S-System formaltheoretisch als das optimale²⁾ erwiesen hat.

Bei dem Two-Bin-System wird fiktiv angenommen, daß sich die Lagerhaltung sozusagen in zwei Behältern vollzieht. Einer enthält das Lager für die unmittelbare Auslieferung, der zweite das Lager, das in dem Zeitraum Verwendung findet, in dem der erste leere Behälter wieder aufgefüllt wird. Um eine derartige Lagerhaltungspolitik ver-

-
- 1) Der Vorteil des s-S-Systems liegt im Kompromiß zwischen mäßigen Kosten für nicht zu große Sicherheitsbestände und nicht zu hohe Dispositionskosten für nicht zu häufige Bestandskontrollen. Der Nachteil des Two-Bin-Systems liegt in den beachtlichen Dispositions- und Bestandsüberwachungskosten, der Nachteil des Constant-Cycling-Systems in den relativ hohen Sicherheitsbeständen, die die Absatzschwankungen von Bestellintervall plus Lieferzeit ausgleichen müssen. Siehe hierzu auch die vergleichenden Beispiele bei Müller-Merbach: Optimale Losgrößen in der Einkaufsdisposition. a.a.O., Teil 1, S. 651/652
 - 2) Vgl. Dvoretzkey, A. - Kiefer, J. - Wolfowitz, J.: On the Optimal Character of the (s,S)Policy in Inventory Theory. In: Econometrica 1953 (21), S. 586 - 596

wirklichen zu können, muß man zwei Größen bestimmen:

- (a) die Nachbestellgrenze (Meldemenge), die uns Schutz gegen eine Verknappung während der Lieferzeit gewährt; es ist dies das Lager im zweiten Behälter.
- (b) Ferner müssen wir die Menge feststellen, die bestellt werden muß, wenn der Vorrat im ersten Behälter erschöpft ist. Dies geschieht mit Hilfe des im vorherigen Kapitel gebildeten Modells. Die Erweiterungen können dabei Berücksichtigung finden.

Für das Rechenbeispiel nehmen wir an:

Jahresbedarf $U = 1300$ ME/Jahr

Preis/Stück $c = 6,50$ DM/ME

Bestellkosten $F = 5,00$ DM/Bestellung

Lagerkosten-

satz $p = 20$ /Jahr

Mittels der Formel (4) erhalten wir

$$x = \sqrt{\frac{200 \cdot F \cdot U}{c \cdot p \cdot T}} \quad \text{wobei } T = 1 \text{ ist}$$

$$x = \sqrt{\frac{200 \cdot 5 \cdot 1300}{6,50 \cdot 20}} = 100$$

$$t_0 = \frac{T \cdot x}{U} = \frac{100}{1300} = \frac{1}{13} \text{ Jahr} = 4 \text{ Wochen}$$

Als optimale Losgröße ergibt sich die Bestellung von 100 Mengeneinheiten, die wir alle 4 Wochen bestellen sollten.

Die Bestimmung der Meldemenge beinhaltet die Sicherung gegen Verknappung, die sich bei der Glasfabrik einmal durch eine schwankende Nachfrage nach den "sonstigen Lagermaterialien" oder innerhalb des "Rohstoffbereichs" bei Annahme einer schwankenden Beschaffungszeit ergeben kann.

Im folgenden wollen wir von einer unregelmäßigen Nachfrage bei gegebener Beschaffungszeit ausgehen. Diese Annahme deckt weitgehend die im Lagerhaltungsbereich der Glasfabrik vorkommenden Fälle, da hiermit auch die Ungewißheit einer schwankenden Beschaffungszeit bei bekanntem konstanten Rohstoffverbrauch erfaßt werden kann, wie sie etwa im Rohstofflager auftritt.¹⁾

Für die Beschaffungszeit wollen wir aufgrund vergangener Aufschreibungen eine Woche annehmen. Wir bezeichnen die Verteilungsdichte der Wahrscheinlichkeit für die wöchentliche Nachfrage mit $f(n)$; s sei die Meldemenge.

Die Wahrscheinlichkeit für die Verknappung während der Lieferzeit (1 Woche) ist dann durch

$$(28) \quad W\{N \geq s\} = G(s) = 1 - F(s) \quad \text{gegeben,}$$

wobei gilt

$$(29) \quad F(s) + G(s) = 1 \quad \text{und}$$

$F(s)$ als kumulative Verteilungsfunktion (Summenfunktion) bezeichnet wird. Sie gibt in diesem Fall die Wahrscheinlichkeit des Nichteintreffens einer Verknappung wieder, während $G(r)$ die Wahrscheinlichkeit einer Verknappung darstellt, d.h. die Möglichkeit, daß die Nachfrage N größer ist als der vorhandene Bestand s . Beide Wahrscheinlichkeiten ergänzen sich zu 1.

Wir wollen nun die Annahme zulassen, daß die Glasfabrik für ihr "sonstiges Lagerhaltungsmaterial" eine einmalige Verknappung innerhalb von 5 Jahren tolerieren muß.

Dies bedeutet, daß $G(s) = \frac{1}{65}$ ist oder

$$(29a) \quad 1 - F(s) = \frac{1}{65} = 0,0154.$$

1) Die folgenden Überlegungen entstammen: Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung ..., a.a.O., S. 300 - 307

Da wir nicht wissen, wie die Nachfrage verteilt ist¹⁾, nehmen wir eine Normalverteilung an, mit dem Mittelwert $\frac{1300}{52} = 25$, als wöchentliche durchschnittliche Nachfrage. Es läßt sich beweisen, daß sich für

$$\bar{n} \geq 10$$

die Poisson-Verteilung immer mehr der Normalverteilung angleicht,^{2) 3)} so daß für die Normalverteilung auch gilt

$$(30) \quad \sigma = \sqrt{\bar{n}}$$

Die Standardabweichung σ kann also in unserem Falle mit hinreichender Genauigkeit als

$$\sigma = \sqrt{25} = 5 \text{ angenommen werden.}$$

Aus den allgemeinen Beziehungen für die Normalverteilung

$$(31) \quad \int_0^r f(x)dx = F(r)$$

-
- 1) Die Aufgabe kann wesentlich erleichtert werden, wenn statistische Aufschreibungen aus der Vergangenheit vorliegen. Hat man etwa Jahresaufschreibungen für den Wochenverbrauch des zu bestimmenden Lagerhaltungsmaterials, so läßt sich daraus ohne Schwierigkeiten die Häufigkeitsverteilung mit den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten $F(r)$ bilden. Diese Häufigkeitsverteilung nähert sich oft der bekannten Normalverteilung an. Aus der Häufigkeitsverteilung ergibt sich ohne weiteres die Summenfunktion ($F(r)$ (kumulative Verteilungsfunktion) bzw. die kumulative Verknappungswahrscheinlichkeit $G(r)$). Von der gegebenen Verknappungswahrscheinlichkeit von $\frac{1}{65}$ ausgehend können wir darin ohne Schwierigkeit die Meldemenge erhalten.
- 2) Vgl. Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung ..., a.a.O., S. 275 - 276. Vgl. dazu auch Kreyszig, E.: Statistische Methoden ..., a.a.O., S. 126 - 127
- 3) Mit diesem Schluß erreichen wir, daß die für die Poissonverteilung gültige Beziehung (30) auch für die Normalverteilung Gültigkeit besitzt.

$$(32) \quad f(r) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r - \bar{n}}{\sigma}\right)^2\right]} \quad \text{(Dichte der Normalverteilung)}$$

$$(33) \quad F(r) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^r e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \bar{n}}{\sigma}\right)^2\right]} dx \quad \text{(Summenfunktion der Normalverteilung)}$$

$$(34) \quad \Phi(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\xi} e^{\left(-\frac{1}{2} t^2\right)} dt$$

ergibt sich

$$(35) \quad F(r) = \Phi(\xi),$$

woraus sich für unser praktisches Beispiel

$$\begin{aligned} \text{aus (29)} \quad G(s) &= 1 - F(s) = 1 - \Phi(\xi), \\ 0,0154 &= 1 - \Phi(\xi), \\ &= 0,9846 \quad \text{errechnen läßt.} \end{aligned}$$

Diesem Wert entspricht nach der tabellierten Normalverteilung ein Wert von

$$\xi = 2,16$$

woraus sich aus

$$(36) \quad \xi = \frac{s - \bar{n}}{\sigma}$$

für

$$(36a) \quad s = \bar{n} + \xi \sigma = 25 + 2,16 \cdot 5 = 35,8 \approx 36 \quad \text{ergibt.}$$

Die Meldemenge beträgt 36 ME, wobei für den Sicherheitsbestand 11 ME veranschlagt sind.

Aus dem erhaltenen Ergebnis lassen sich nun - sozusagen im Rückschluß - wiederum die Auswirkungen auf die Gesamtkostenentwicklung und die Bestellgröße bestimmen.

Hierbei haben wir folgende Kosten zu berücksichtigen:

- (1) die Lagerhaltungskosten des "aktiven" Lagers;
- (2) die Nachbestellkosten und
- (3) die Lagerhaltungskosten für das Sicherheitslager.

Die ersten beiden Kostenarten sind aus Gleichung (3a) ersichtlich. Die dritte Kostenart ergibt sich aus

$$(37) \quad K_{sl} = \frac{1}{2} \frac{cp}{100} \cdot w,$$

wobei $w = 6,5$ aus (36a) ist.

Mit den in unserem Beispiel verwendeten numerischen Werten und unter Nichtberücksichtigung der Einkaufspreise und Vernachlässigung des Planungszeitraumes ergibt sich:

$$(38) \quad K = \frac{FU}{x_0} + \left(\frac{x}{2} + w\right) \frac{c \cdot p}{100}$$

Nach Einsetzen unserer Werte erhalten wir:

$$K = 144,30 \text{ [DM]} \quad \text{bei } w = 11.$$

Es fragt sich, ob dies wirklich das Gesamtkostenminimum darstellt. Wir haben bei der Bestimmung von x_0 zu Beginn unserer Überlegungen die Lagerhaltungskosten ohne das Sicherheitslager berücksichtigt. Richtiger wäre es gewesen, aus Gleichung (38) die Größe x_0 abzuleiten.

Wir wollen nun diesen Weg beschreiten, um zu überprüfen, inwieweit unsere einfache Lösung richtig ist.

Die Verknappungswahrscheinlichkeit für eine einzelne Lieferperiode ist durch

$$(39) \quad W(N \geq \bar{n} + w) \text{ gegeben.}$$

Die Anzahl der Bestellungen pro Jahr beträgt $\frac{U}{x}$ und man kann daher die zulässige Wahrscheinlichkeit für eine Verknappung pro Jahr mit

$$(40) \quad v = \frac{U}{x} W \{ N \geq \bar{n} + w \} \text{ annähern.}$$

Dabei ist $v = 0,2$, da wir alle 5 Jahre eine Verknappung zulassen wollen.

Wir formulieren dann das Problem:

Unter Annahme einer Verknappungswahrscheinlichkeit nach (40) soll die Bestellmenge x und der Sicherheitslagerbestand w so bestimmt werden, daß die durch Gleichung (38) ausgedrückten Gesamtkosten ein Minimum werden.

Die Lösung ergibt sich, indem wir für x verschiedene Werte annehmen und w aus Gleichung (40) bestimmen. Mit den gegebenen Werten von x und w berechnen wir sodann K nach (38) und erhalten folgende Ergebnisse:

x	Anzahl der Bestellungen / Jahr	w	K
65	20	11,70	157,46
93	14	10,95	144,57
100	13	10,70	143,91
108	12	10,65	144,04
130	10	10,30	147,89

Es zeigt sich, daß dieses Ergebnis im wesentlichen mit dem zuerst erhaltenen übereinstimmt, obwohl betont werden muß, daß zwischen der besten Bestellmenge und dem Sicherheitslagerbestand eine Wechselwirkung besteht und es durchaus möglich ist, daß die einfache Lösung in gewissen Fällen nicht genau genug ist.

V. Kritische Würdigung

Im vorliegenden Kapitel haben wir in aller Kürze versucht, die Möglichkeiten der wissenschaftlichen Lagerbewirtschaftung anhand der Gegebenheiten der Glasfabrik darzustellen. Wir konnten uns dabei auf die relativ einfach liegenden Verhältnisse des "Rohlagers" beschränken, dessen Lagerabgang weitgehend vom regelmäßigen und bestimmbaren Bedarf des Produktionsbereiches geprägt ist,

und wir mußten dabei nicht die mehrwertigen Unsicherheiten der Absatzseite berücksichtigen. Bei unseren Ansätzen pflegen wir nur eine statische Betrachtung,¹⁾ obwohl die Beschränkung auf eine Periode unrealistisch erscheint und es sich beim Bestellproblem in der Regel um ein echtes mehrstufiges Entscheidungsproblem handelt.²⁾ Der von uns dargestellte Ansatz kann aber auch in der statischen Betrachtung mit Erfolg gelöst werden.³⁾

Bei unseren Erörterungen haben wir uns auf die modellmäßige Behandlung verschiedener Problemsituationen beschränkt und sind nicht weiter auf die einzelnen Ermittlungsprobleme der Parameter und Abhängigkeiten eingegangen. Wir verkennen nicht, daß gerade hier im Einzelfall Schwierigkeiten auftreten können, die einen Ansatz für kritische Einwände ergeben. Andererseits ist es aber besonders bei den Lagerhaltungsmodellen so, daß die optimale Lösung nicht schon bei kleineren Abweichungen der Parameter unbrauchbar wird, sondern sich brauchbare Resultate auch dann ergeben, wenn die Parameter nicht mit letzter Genauigkeit feststellbar sind.^{4) 5)}

-
- 1) Der Zeitfaktor findet nicht in der Form Beachtung, daß Zeitenfolgen $t_1, t_2 \dots t_n$ untersucht werden, sondern die Betrachtung des Ablauf erfolgt immer innerhalb eines vorgegebenen Zeitraumes.
 - 2) Vgl. etwa den dynamisch-stochastischen Ansatz bei Starr, M.K. - Miller, D.W.: Inventory Control: Theory and Practice. Englewood Cliffs 1962, S. 112 - 167
 - 3) Vgl. dazu auch den statisch-stochastischen Ansatz von Arrow, K.J. - Harris, Th. - Marschak, J.: Optimal Inventory Policy. In: Econometrica 1951 (19), S. 250 - 272, hier besonders S. 250 - 260
 - 4) Vgl. Hadley, G. - Whitin, Th.M.: Analysis ..., a.a.O., S. 406
 - 5) Vgl. Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen ..., a.a.O., Teil 1, S. 636. Er geht davon aus, daß für die Daten F (Fixkosten der Bestellung), U (Bedarfsmenge im Planungszeitraum) und p (Lagerkostensatz) in den meisten Fällen Ungenauigkeiten von 10 - 20 % in Kauf genommen werden müssen; dadurch wird auch die Opti-

Fortsetzung siehe Seite 242

Über alle hier gemachten Unterstellungen und die Praktikabilität der erzielten Ergebnisse sowie etwaige auftretende Grenzen können wir kein pauschales Urteil fällen. Die Besonderheiten jedes Anwendungsfalles bedingen eigene Methoden mit entsprechenden Anwendungsgrenzen.

Mit der Trennung in zwei verschiedene Modelltypen haben wir der unterschiedlichen Situation des regelmäßigen Lagerabgangs der direkt von der Produktion beanspruchten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe und der schwankenden - nur innerhalb statistischer Grenzen bestimmbarer - Abgangsrate des "sonstigen Lagerhaltungsmaterials" Rechnung getragen.

In der praktischen Abwicklung ist die Lagerbewirtschaftung für ein größeres Unternehmen nur unter Verwendung einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage denkbar.

Bei der Glasfabrik erfolgt die Bewirtschaftung des Lagerhaltungsmaterials schon heute mittels einer Rechenanlage, wobei es jederzeit möglich wäre, die Bewirtschaftung der Vorräte¹⁾ über ein vorgeschaltetes Lagerhaltungsmodell abzuwickeln.²⁾ Die Frage hierbei ist nur, inwieweit die Wirtschaftlichkeit von erforderlichem Ermittlungs- und Verarbeitungsaufwand³⁾ und den dadurch er-

5) Fortsetzung von Seite 241:

malmenge bis zu 30 % ungenau. Mit Hilfe der Sensibilitätsanalyse hat er aber gezeigt, daß derartige Abweichungen vom Optimum keine wesentlichen Mehrkosten hervorrufen und damit diese ungenauen Daten durchaus den Zweck erfüllen, den Optimalbereich zu bestimmen.

- 1) Die Bewirtschaftung umfaßt rund 3.000 Artikel.
- 2) Ein Ablaufdiagramm für Mengen-, Termin- und Sicherheitsbestandsrechnung findet sich bei Gebhardt-Seele, P.: Rechenmodelle für wirtschaftliches Lagern und Einkaufen - Disposition mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. München - Wien 1962, S. 116, 111, 104
- 3) Darunter fallen besonders die Kosten für Modellentwicklung, Parameterermittlung, Computerzeit, qualifiziertes Personal etc.

reichten Kosteneinsparungen gewährleistet ist. Diese Entscheidung kann aber nicht Aufgabe dieser Arbeit sein.

Allgemein läßt sich feststellen, daß auch die neuen Ansätze zur Steuerung der Lagerhaltung das Unternehmerisiko nicht gänzlich ausschalten, sondern nur reduzieren können. Die Methoden der Lagerhaltungssteuerung sollen nur dazu beitragen, das Risiko abzuschätzen und das optimale Vorgehen innerhalb der Ziele der Unternehmung zu planen. Dabei treten dann neben den speziellen Grenzen der Modellbildung auch allgemeine Grenzen in Form von unterschiedlichen Zielen - sogenannten Zielkonflikten - auf, die die Anwendung dieser Methoden beeinflussen.

3) Die Fertigungsprogrammplanung in der Glasfabrik

Eines der immer wieder angeführten Hauptanwendungsbeispiele von Operations Research ist die Verwendung des Linear Programming innerhalb der quantitativen Fertigungsprogrammplanung. Wir wollen im folgenden unter Anlehnung an die schon im theoretischen Teil gemachten Ausführungen die Gegebenheiten der Glasfabrik für die Anwendung des Linear Programming untersuchen, ohne uns - außer am einfachen Beispiel - mit der praktischen Verwirklichung zu befassen.¹⁾

I. Grundvoraussetzungen für die Anwendung des Linear Programming bei der Fertigungsprogrammplanung und ihr Vorhandensein bei der Glasfabrik

Die Grundvoraussetzungen, unter denen Linear Programming Anwendung findet, leiten sich aus einer technisch gedachten Produktionsfunktion, die eine bestimmte Beziehung zwischen der Ausbringung eines Unternehmens und den Einsatzmengen der für die Produktion erforderlichen produktiven Faktoren herstellt, ab, über deren konkret technischen Inhalt die Wirtschaftstheorie jedoch im allgemeinen sehr wenig aussagt.²⁾ Erst GUTENBERG hat versucht, genauere Aussagen über diese technischen Produktionsbedingungen in die Produktionsplanung einzubauen. Wenn das Problem der Fertigungsplanung im Unternehmen

¹⁾ Im folgenden können wir dabei auf Überlegungen bei Fischenr, K.H.: Die Bestimmungen der wirtschaftlichen Produktions- und Absatzmenge bei industrieller Sortenfertigung unter Anwendung der Linearen Programmierung. Diss. Mannheim 1960, für eine Bonbonfabrik zurückgreifen.

²⁾ Vgl. Albach, H.: Produktionsplanung auf der Grundlage technischer Verbrauchsfunktionen. In: Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Heft 105, S. 46

exakt und für betriebliche Entscheidungen in brauchbarer Weise gelöst werden soll, dann genügt es nicht, die wirtschaftlichen Überlegungen auf vagen Vorstellungen über die technischen Produktionsprozesse aufzubauen in der Hoffnung, daß der Betriebsingenieur die konkreten Unterlagen in der angenommenen Form vorlegen könne. Vielmehr müssen die technischen Produktionsbedingungen von vornherein berücksichtigt werden. Mit Recht kann daher gesagt werden, "that the production function short-circuits certain aspects of the problem that the engineer cannot afford to neglect. The economist cannot afford to neglect them either when he wants to look inside the firm."¹⁾ Die moderne Unternehmensforschung ermöglicht es nun, die Fragen der Produktionsplanung genauer, d.h. unter Berücksichtigung der technischen Produktionsbedingungen des einzelnen Unternehmens, zu beantworten.²⁾

Bei unseren Überlegungen wollen wir prüfen, ob die Voraussetzungen, die die Anwendung des Produktionsmodells bestimmen, im theoretischen Ansatz und in arbeitstechnischer Sicht am Beispiel der Glasfabrik gegeben sind. Dabei wollen wir folgende Punkte einer näheren Betrachtung unterziehen:³⁾

- (1) Linearität von Kosten, Erträgen und Nebenbedingungen,
- (2) Konstante a-Koeffizienten,
- (3) Kurzfristig unveränderliche Kapazitäten,

1) Dorfman, R. - Samuelson, P.A. - Solow, R.M.: Linear Programming and Economic Analysis. New York - Toronto - London 1958, S. 131

2) Eine Herleitung dieses neueren Ansatzes aus der traditionellen Produktionstheorie findet sich bei Albach, H.: Produktionsplanung ..., a.a.O.
Vgl. auch Wittmann, W.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 1 - 17

3) Bezüglich der Terminologie (a-, b- und c-Koeffizienten) und des mathematischen Aufbaues des Produktionsmodells können wir auf Teil 1/A/III/2/bb und cc und Teil 1/B/II/3/a und b verweisen.

- (4) Analyse der Produktionszusammenhänge,
- (5) Rechnen in Zeitmengen.

Bevor wir uns den Kriterien im einzelnen zuwenden, wollen wir noch die Voraussetzung der Quantifizierbarkeit der Einflußgrößen untersuchen.

Die Quantifizierbarkeit der Einflußgrößen bedeutet, daß alle für das betreffende betriebswirtschaftliche Entscheidungsproblem relevanten Einflußgrößen in meßbaren, zählbaren oder zumindest schätzbaren Einheiten angegeben werden müssen. Für die Daten der Nebenbedingungen, d.h. die Produktionskoeffizienten a und die Kapazitäten b , lassen sich im allgemeinen zählbare, meßbare oder schätzbare Einheiten aufzeigen. Für die c -Koeffizienten der Zielfunktion des allgemeinen Produktionsmodells finden sich immer dann numerische Werte, solange etwa die Maximierung von Umsätzen oder Nutzeneinheiten oder die Minimierung von Kosten oder Zeiteinheiten gesucht wird. Problematisch wird es, falls bei betriebswirtschaftlichen Entscheidungsproblemen mehrere Entscheidungskriterien gleichzeitig beachtet werden sollen oder nicht-quantitative Entscheidungskriterien, wie Erhaltung eines Kundienstammes, eines Good-will, eines guten Kontaktes zu Banken, Behörden und anderen Institutionen, die Fortsetzung traditionell begründeter Verhaltensweisen, die Bewahrung einer gewissen Unabhängigkeit gegenüber der Belegschaft, der Gewerkschaft, des Kapitaleigners usw. beachtet werden sollen. In Einzelfällen¹⁾ lassen sich auch hierbei Lösungen finden, aber im allgemeinen können solche nicht-quantifizierbare Einflußgrößen im Modellansatz nicht berücksichtigt werden.²⁾

-
- 1) Vgl. dazu die Ausführungen bei Bohmer, R.: Die Anwendbarkeit der Linearen Programmierung auf betriebswirtschaftliche Planungsprobleme. Diss. Köln 1963, S. 114 - 122
 - 2) Vgl. hierzu besonders Klahr, C.N.: Multiple Objectives in Mathematical Programming. In: JORSA 1958 (6), S. 849 - 855

1. Linearität von Kosten, Erträgen und Nebenleistungen

In unserer Zielfunktion soll der Ansatz

$$\sum c_k x_k = \text{Max} \quad k = 1 \dots n$$

gelten, wobei wir c_k als den Deckungsbeitrag¹⁾ aus der Differenz von Stückpreis p_k und den variablen (erzeugungsabhängigen) Kosten k_v ermitteln. Das bedeutet, daß der Deckungsbeitrag aus Erlös minus variable Kosten, unabhängig von dem Ausbringungsniveau, für die einzelnen Produkte x_k konstant zu sein hat. Der Deckungsbeitrag ist dann unabhängig vom Beschäftigungsniveau und konstant, wenn der Verkaufspreis p_k konstant ist, und wenn die Stückkosten konstant sind. Da die Stückkosten aber nicht als Durchschnittswerte der Gesamtkostenfunktion ermittelt werden, sondern lediglich als variable Kosten definiert worden sind, muß zur Bestimmung der k_v -Werte die Trennung von fixen und variablen Kosten möglich sein. Es werden also

- konstante variable Stückkosten k_v
- konstante Verkaufspreise p_k und
- die Möglichkeit der Trennung von fixen und variablen Kosten vorausgesetzt.²⁾

a) Die Voraussetzung konstanter variabler Stückkosten k_v

Die erste Voraussetzung führt über

$$\sum x_k k_v + k_{\text{fix}}$$

zu einer linearen Gesamtkostenkurve der Unternehmung und

1) Vgl. dazu die verschiedensten Ausdrücke, die für diesen Deckungsbeitrag in der deutschen und angelsächsischen Literatur verwendet werden. In: RKW: Das Rechnen mit Grenzkosten - Direct Costing. 1960. Übers. eines amerikanischen Forschungsberichtes der National Association of Accountants (NAAC). S. 72 - 74

2) Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 131/32

damit zur oft diskutierten Frage, ob die Gesamtkosten einer Unternehmung mit industrieller Produktion linear oder nichtlinear verlaufen. Wir wollen den ganzen Fragenkomplex nicht noch einmal aufrollen, sondern nach KILGER¹⁾ einen linearen Gesamtkostenverlauf unterstellen, wobei wir für unsere Planungen von einem ohne Progressionserscheinungen schon seit längeren laufenden Betrieb ausgehen wollen.²⁾ Da obige Gesamtkostenfunktion mehr eine aufgrund des normalen Ablaufes konstruierte Funktion ist, wollen wir Anpassungen quantitativer, zeitlicher und intensitätsmäßiger Art in ihrer Erfassung im Produktionsmodell untersuchen. Dabei kann grundsätzlich festgestellt werden, daß im allgemeinen Produktionsmodell am Anfang eine Anpassungsmöglichkeit nicht explizit berücksichtigt wird. Das optimale Fertigungsprogramm bringt aber automatisch eine quantitative und zeitliche Anpassung³⁾ mit sich, unter Zugrundelegung einer gegebenen Intensität. Intensitätsanpassungen sind dagegen nur unter ganz bestimmten Annahmen zu berücksichtigen, etwa:

- Bei der Definition der b-Werte wird die maximale intensitätsmäßige Benutzung der einzelnen Produktionsfaktoren angenommen.⁴⁾
- Anstelle eines, die Nutzungsintensität selbst als Entscheidungsvariable einführenden, nichtlinearen und mit

1) Vgl. Kilger, W.: Produktions- und Kostentheorie. Wiesbaden 1958. S. 48 - 52, 115 - 128 - Die Mehrzahl der deutschen Betriebswirtschaftler geht konform in der Annahme, daß - abgesehen vom Beginn der Beschäftigung und der Überbeschäftigung - die Normalbeschäftigung einen annähernd linearen Gesamtkostenverlauf ergibt. Vgl. dazu auch Schäfer, E.: Die Unternehmung ..., a.a.O., S. 244

2) Zur Diskussion der Verwendung von linearen Funktionen innerhalb der Programmplanung vgl. besonders Mawick, P.: a.a.O., S. 25 - 45

3) Die quantitative Anpassung läßt sich, da wir im folgenden in Zeitmengen rechnen, unter die zeitliche Anpassung subsumieren.

4) Vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 136

den heutigen Methoden noch nicht lösbarer Modells, schlägt ALBACH die Approximation durch ein, die einzelnen Intensitätspunkte als selbständige Programmansätze betrachtendes - letztlich sehr viel größeres - lineares Modell vor.¹⁾

Die Frage der intensitätsmäßigen Anpassung ist insofern von untergeordneter Bedeutung, als mit zunehmender Mechanisierung und Automatisierung industrieller Produktionsprozesse die quantitative und die zeitliche Anpassung bevorzugt werden, um möglichst mit dem optimalen Wirkungsgrad der maschinellen Anlagen arbeiten zu können. Oft ist nämlich eine unterschiedliche Intensität gar nicht mehr möglich, da die Maschinen nur in einer Gangart - der optimalen - arbeiten können.

Treten trotzdem nichtlineare Kostenfunktionen auf, so gibt es drei Möglichkeiten ihrer Berücksichtigung:

- (1) Der zu berücksichtigende Beschäftigungsbereich wird hinreichend klein gewählt, so daß innerhalb dieses Teilabschnittes die Kostenfunktion tendenziell linear verläuft. Diese Art der Linearisierung ist problematisch und kann zu einer wesentlichen Verfälschung des Gewinnmaximums führen.
- (2) Die nichtlineare Funktion wird für den relevanten Beschäftigungsbereich durch eine lineare Funktion mit Hilfe einer Rechnung (Methode der kleinsten Quadrate) oder einer zeichnerischen Ermittlung derart ersetzt, daß die Abweichungen so klein wie möglich sind. Eine Fehlergrößermittlung ist dabei möglich.
- (3) Ein erweitertes Produktionsmodell wird in der Form

1) Vgl. Albach, H.: Produktionsplanung ..., a.a.O., S. 63 - 67
Albach gibt auch Ansätze für das Problem einer Absatzänderung und der daraus resultierenden optimalen Anpassung in quantitativer, zeitlicher und intensitätsmäßiger Hinsicht. Vgl. Albach, H.: a.a.O., S. 68 - 94

formuliert, daß für den Bereich der nichtlinearen Funktion mehrere linear angenäherte Funktionen definiert werden. Zwei Teilabschnitte ergeben gewöhnlich schon eine hinreichende Genauigkeit.¹⁾

b) Die Voraussetzung konstanter Verkaufspreise p_k

Eine zweite Voraussetzung stellen die konstanten Verkaufspreise p_k der k -ten Produktart auch bei unterschiedlichen Absatzmengen dar. Dies bedeutet, daß für die Umsatzfunktion $p_k x_k$ gilt. Nun zeigt man üblicherweise die zwischen dem Verkaufspreis p_k und der Absatzmenge x_k bestehenden Beziehungen in der sogenannten Preis-Absatz-Funktion, wobei die Konstanz des Verkaufspreises unter Berücksichtigung der verkauften Menge nicht nur eine lineare, sondern auch konstante Preis-Absatz-Funktion voraussetzt, die als Gerade parallel zur Abszisse verläuft. Die Frage ist nun, ob die in der Glasindustrie üblichen mengenabhängigen, erlösmindernden Rabatte die Nichtlinearität der Erlöse begründen.

Hierbei muß man zwischen Nichtlinearität und Nichtkonstanz unterscheiden. Bei den um die Rabatte und sonstigen Konditionen verminderten Erlösen handelt es sich um eine Nichtkonstanz und nicht um eine Nichtlinearität.²⁾ Nichtlinearität würde auftreten, wenn die Stück-Erlöse eine Funktion der zu produzierenden Menge wären:³⁾

$$E = f(x_i)$$

1) Im übrigen arbeiten auch die flexible Plankostenrechnung und vor allem die Grenzplankostenrechnung mit der Annahme linearer Gesamtkostenfunktionen. Eventuell auftretende Ungenauigkeiten werden von den Unternehmensleitungen als nicht zu wesentlich betrachtet.

2) Vgl. Mawick, P.: a.a.O., S. 21 - 23

3) Künzi-Krelle gehen bei ihren Überlegungen in: Künzi, H.P. - Krelle, W.: Nichtlineare Programmierung. Berlin, Göttingen, Heidelberg 1962, S. VI von keinen praktischen, sondern wissenschaftlichen Erfordernis-

Gegen diese Annahme spricht die Realität des festgefügteten Glas-Marktes, der bisher eine Preispolitik infolge des bestehenden Rabattkartells¹⁾ nicht zugelassen hat sowie die Starrheit des Marktes, der auf eine Änderung des Angebots nicht mit einer kurzfristigen Mengenänderung reagiert. Inkonstanz der Stückerlöse läßt sich demgegenüber durch Durchschnittserlöse oder durch Berücksichtigung in verschiedenen linearen Modellen erfassen, wobei ersterem Ansatz aus praktisch-lösungstechnischen Gründen der Vorzug zu geben ist.²⁾

c) Die Trennung in fixe und variable Kosten

Die dritte Voraussetzung, die der Trennung von fixen und variablen Kosten, hat großen Einfluß auf die Genauigkeit der Inputdaten und damit der Modelllösung.³⁾

Grundsätzlich läßt sich feststellen, daß eine Trennung von fixen, d.h. beschäftigungsunabhängigen und variablen Kosten mit den verschiedensten Methoden versucht worden ist. Dabei tritt in der Mehrproduktunternehmung noch das Problem auf, inwieweit die einzelnen Kostenarten den

3) Fortsetzung von Seite 250:

sen aus, wenn sie auf die Notwendigkeit von nichtlinearen Ansätzen bezüglich der Erlöse hinweisen. Ihre Hinweise auf Krelles Buch "Preistheorie", S. 629 ff. beziehen sich auf eine optimale simultane Preis-Produktions- und Reklamepolitik, wo die Notwendigkeit einer theoretischen Annahme der Nichtlinearität nicht zu bezweifeln ist.

1) Vgl. FAZ: Fensterglaskartell darf wirksam werden. In: FAZ 22.4.1968, S. 13

2) Zur weiteren Erörterung theoretisch möglicher Probleme und der modellmäßigen Lösung der verschiedenen Formen der Preis-Absatzfunktion vgl. Bohmer, R.: a.a.O., S. 142 - 156

3) Im weiteren stützen wir uns auf die Ausführungen bei Rühli, E.: Optimale Sortimentsplanung mit Linearer Programmierung. Mitteilungen aus dem handelswissenschaftlichen Seminar der Universität Zürich, Heft 118, Zürich 1963, S. 24 - 26

Produkten (Kostenträgern) zurechenbar sind. Man unterscheidet daher zwischen Einzelkosten, die einem Kostenträger direkt zurechenbar und Gemeinkosten, die auf eine Vielzahl von Kostenträgern bezogen sind.

Beide Betrachtungsweisen kombiniert ergeben folgendes Schema:

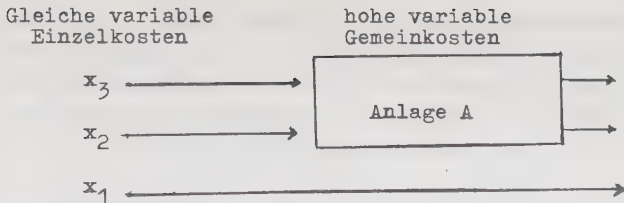
	Fixe Kosten	Variable Kosten
Einzelkosten :	Fixe Einzelkosten ¹⁾	Variable Einzelkosten
Gemeinkosten :	Fixe Gemeinkosten	Variable Gemeinkosten

Für die Kostenkoeffizienten k_v kommen dabei nur die variablen Kosten in Frage, denn innerhalb der Ermittlung des Fertigungsprogrammes ist es entscheidend festzustellen, wie sich die totalen variablen Kosten ändern, wenn z.B. x_1 weniger und x_2 mehr produziert wird. Die fixen Kosten bleiben dabei ex definitione gleich.²⁾ Für uns sind aber nur die kostenändernden Einflüsse der Programmverschiebung von Interesse. Dabei bereitet die Erfassung der variablen Einzelkosten in ihrer Zuordnung zu den einzelnen Produktarten keine Schwierigkeit, während bei der Zurechnung der variablen Gemeinkosten Schwierigkeiten auftauchen. Einerseits gibt es meist keinen vernünftigen Maßstab, nach dem sie auf die einzelnen Produkte aufgeteilt werden können, andererseits sind sie von der produzierten Menge abhängig und gehören daher in die Zielfunktion. Am Beispiel sei es verdeutlicht.

Produkt x_1 und x_2 haben die gleichen variablen Einzelkosten. Produkt x_2 laufe zusammen mit anderen Produkten über die Anlage A, die hohe variable Gemeinkosten aufweist. x_1 berührt diese Anlage nicht.

1) Fixe Kosten, dem Kostenträger direkt zurechenbar

2) Die Beurteilung der fixen und variablen Kosten ist letztlich zeitabhängig, wobei wir hier eine kurzfristige Betrachtungsweise pflegen.



Es ist offensichtlich, daß in einem solchen Fall das Produkt x_1 kostenmäßig dem Produkt x_2 vorzuziehen ist. Das kann aber nur dadurch erreicht werden, daß die variablen Gemeinkosten der Anlage A auch in die Kostenkoeffizienten des Produktes x_2 aufgenommen werden. Die Schwierigkeit der Schlüsselung ändert dabei nichts an der Notwendigkeit, sie zu vollziehen. Es fragt sich allerdings, ob es praktisch notwendig ist, alle variablen Gemeinkosten zu berücksichtigen. Das ist dann nicht der Fall, wenn aus einer Schlüsselung keine unterschiedliche Belastung der einzelnen Artikel resultiert. Praktisch gilt das für variable Gemeinkosten, die alle Produkte gleichmäßig betreffen.

Es bliebe nun noch zu klären, wie die variablen Einzel- und Gemeinkosten ermittelt werden können. Dies soll aber zu einem späteren Zeitpunkt geschehen.¹⁾

d) Die Linearität der Nebenbedingungen

Die Linearität der Nebenbedingungen läßt sich durch die Ungleichung

$$\sum a_{ik} x_k \leq b_i \quad (i = 1, 2 \dots m)$$

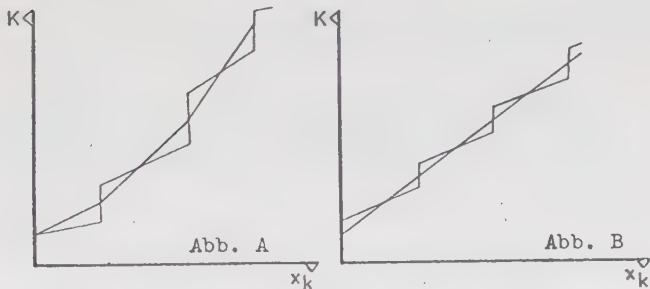
ausdrücken.

1) Zum Problem der Kostentrennung vgl. auch Bohmer, R.: a.a.O., S. 156 - 157 und Mawick, P.: a.a.O., S. 46 - 60 sowie Rühli, E.: a.a.O., S. 26 - 47

Bei Unterstellung konstanter Koeffizienten - auf die später noch einzugehen sein wird - behandelt die Nebenbedingung die zwischen den Verbrauchsmengen (Inputs) und den Leistungen (Outputs) bestehenden Beziehungen. Man spricht von der sogenannten Verbrauchsfunktion.

Bestehen diese Inputs aus Rohstoffen und die Outputs aus Einheiten der k-ten Produktart, so können aus dieser Verbrauchsfunktion die a-Koeffizienten unmittelbar abgeleitet werden. Die a-Koeffizienten sind dabei konstant, wenn bei unterschiedlicher Ausbringung die Verbrauchsfunktion linear verläuft. Meistens entstehen aber die Produkteinheiten nicht in einer Produktionsstufe, sondern in mehreren Stufen. Somit liegen den a-Koeffizienten mehrere Verbrauchsfunktionen der einzelnen Teileinheit zugrunde, und es muß gelten, daß der a-Koeffizient bei Beschäftigungsschwankungen dann konstant ist, wenn alle Verbrauchsfunktionen linear verlaufen. Die Voraussetzung der bei Beschäftigungsschwankungen konstanten Produktionskoeffizienten ergibt somit lineare Verbrauchsfunktionen. Lineare Verbrauchsfunktionen führen bei konstanten Faktorpreisen zu linearen Kostenverläufen, insgesamt zu einer linearen Gesamtkostenkurve. Die Problematik der Anpassungsmöglichkeiten ist vorher schon in etwas anderem Zusammenhang gestreift worden und soll hier in ihrer Bedeutung für die Linearität noch einmal kurz angedeutet werden. Quantitative und zeitliche Anpassung (keine Überstundenanpassung) bei Beschäftigungsschwankungen ergeben bei gleichbleibender Intensität konstante a-Koeffizienten. Die bei quantitativer und zeitlicher Anpassung auftretenden intervallfixen Kosten können unberücksichtigt bleiben, wenn innerhalb des relevanten Beschäftigungsbereiches keine wesentlichen Veränderungen der fixen Kosten zu erwarten sind. Im anderen Fall wird das Problem durch die Formulierung eines erweiterten LP-Modells mit vielen Teilabschnitten gelöst (Abb. a). Bei stets gleich hoch auftretenden intervallfixen Kosten mit

stets gleichem Steigerungsmaß innerhalb der einzelnen Teilabschnitte genügt die Definition einer durchschnittlich linearen Funktion (Abb. b).



Bei einer intensitätsmäßigen Anpassung ergeben sich unterschiedliche a -Koeffizienten. Der Versuch ALBACHS mit einer Auflösung in verschiedene Intensitätspunkte erscheint durchaus gangbar, wenn er auch im Hinblick auf die Glasfabrik für die maschinelle Ausrüstung ohne wesentliche Bedeutung ist. Alle für die Programmplanung relevanten Betriebsmittel sind intensitätsmäßig - mit einer Ausnahme - nicht anzupassen.¹⁾ Dabei handelt es sich um einen halbautomatischen Schneidtisch, der mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten zu fahren ist. Ein Ansatz im Sinne ALBACHS erscheint dabei möglich. Ein ganz anderes Problem stellt die Möglichkeit unterschiedlicher Geschwindigkeiten der Ziehmaschinen dar. Hierbei besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dicke, d.h. Produktart des Glases; damit ist aber eine intensitätsmäßige Anpassung je Produktart (jede Dicke) nicht möglich, der a -Koeffizient ist konstant. Für die Glasfabrik darf daher insgesamt die realistische

1) Alle anderen, für unseren Planungsansatz interessierenden Betriebsmittel, werden weitgehend von Menschen bedient. Die Schwierigkeit der Bestimmung einer Normalintensität derselben läßt uns die Möglichkeit der planerischen Anpassung von vornherein ausschließen.

Annahme unterstellt werden, daß die a-Koeffizienten bei Beschäftigungsschwankungen als konstant angegeben werden können.¹⁾

2. Konstante Koeffizienten

Die Voraussetzung konstanter Koeffizienten ist im Einzelfall schon bei der Besprechung der Linearität geprüft worden, soll hier aber noch einmal zusammenfassend aufgezeigt werden.

Die c- und a-Koeffizienten sind immer dann konstant, wenn die zugrundeliegenden Funktionen linear sind. Bei den c-Koeffizienten schließt das die Konstanz der Verkaufspreise und der Preise der einzelnen Produktionsfaktoren ein, da der Fall des gleichbleibenden Abstandes zwischen inkonstanten Verkaufspreisen und variierenden Stückkosten höchst selten sein dürfte.

Im Falle unseres Untersuchungsbeispiels können wir kurzfristige, d.h. innerhalb der Planungsperiode auftretende Änderungen der Verkaufspreise durch konjunkturelle oder saisonale Einflüsse, durch Aktionen oder Reaktionen der Konkurrenzunternehmer²⁾ oder Kunden verneinen. Das gleiche gilt für die Einkaufspreise der Produktionsfaktoren, da langfristige Lieferverträge bestehen.

1) Natürlich kann der Glasschneider mit unterschiedlicher Intensität arbeiten. Für unseren Planungsansatz müssen wir hierbei aber eine durchschnittliche Intensität unterstellen, da
a) deren Erfassung und
b) deren Verarbeitung
praktisch nicht zu bewältigende Probleme mit sich bringen würde. Wir sind uns der Einschränkung des gesamtheoretischen Ansatzes bewußt, müssen aber aus anwendungstechnischen Überlegungen diese Einschränkung gelten lassen. Sie wird nicht die einzige bleiben.

2) Rabattkartell mit Großhändlerbelieferung

Die Konstanz der variablen Stückkosten (s. Seite 247 ff.) ist innerhalb der Linearitätsvoraussetzung geprüft worden und darf bei der Glasfabrik unterstellt werden. Etwaige Preisänderungen bei den fixen Kostenarten beeinflussen nur die Gesamtkosten des Produktionsmodells, nicht aber die Struktur der Lösung.

Konstante a -Koeffizienten bedeuten, daß sich Qualität bzw. Ergiebigkeit der einzelnen Produktionsfaktoren sowie, daraus resultierend, die Qualität der Einsatzstoffe, nicht ändert. Unvorhergesehener Ausschuß, Maschinenausfall, starke Fluktuation des Personals und ähnliche störende Faktoren führen zur Variation der a -Koeffizienten. Bei unserem Modellbeispiel haben wir mangels Beherrschbarkeit der Produktion immer wieder mit überdurchschnittlichen Ausfällen sowie "Stürzen"¹⁾ bei den Ziehmaschinen" zu rechnen. Auch die Ziehdüse ist unvorhergesehenen Verschleißerscheinungen unterworfen, die manchmal die Glasqualitäten bis zum Ausschuß beeinflussen. Überhaupt ist die Frage der Beherrschbarkeit der Glasproduktion für die Planung des Fertigungsprogrammes der Glasfabrik das wichtigste Merkmal.²⁾

Wir sind allerdings der Meinung, daß es trotz der mangelnden Beherrschung des Einzelfalles gelingt, aus der Häufigkeitsverteilung der Vergangenheitswerte Mittelwerte zu bilden, die es gestatten, hinreichend genaue a -Koeffizienten für den Planansatz der einzelnen Produkte zu erhalten. Diese Aussage bezieht sich auch auf die vorhandenen Produktionskapazitäten, die im Einzelfall durch

1) Von einem Sturz der Ziehmaschine spricht man, wenn das senkrecht aus der Glaswanne gezogene Glasband zum Einsturz kommt, d.h. die Bindung verliert und in sich zusammenstürzt. Dies zu verhindern sind sogenannte Beobachter aufgestellt, die aber auch bei größter Aufmerksamkeit einen "Sturz" nicht immer verhindern können.

2) Vgl. Kap. C/III dieser Ausführungen

Ausfall rasch veränderlich, in der statistischen Masse aus Vergangenheitswerten aber hinreichend genau bestimmbar sind.

3. Kurzfristig unveränderliche Kapazitäten

Diese Voraussetzung liegt eigentlich implizit schon in der Konstanz der Inputdaten mit begründet, soll der Vollständigkeit halber aber hier noch einmal aufgegriffen werden.

Die Fertigungsplanung unterstellt kurzfristig fixe, exakt begrenzte Kapazitäten. Um die Nebenbedingungen berücksichtigen zu können, ist es notwendig, für jede Anlage die Kapazität zu messen und die Produktionskoeffizienten jeder Produktart auf dieser Anlage zu bestimmen. Dabei können die einzelnen Produktionsstufen eine oder mehrere Anlagen umfassen. Sind auf einer Produktionsstufe mehrere gleichartige Anlagen vorhanden, so können diese durch Addition zu nur einer Kapazität zusammengefaßt werden, so daß für mehrere Anlagen der Produktionsstufe (S) nur eine Nebenbedingung besteht. Dies ist jedoch dann nicht möglich, wenn auf der Produktionsstufe S, die mehrere Anlagen umfaßt, gewisse Artikel zu ihrer Herstellung an eine bestimmte Maschine gebunden sind, während andere Erzeugnisse diesbezüglich keine Bindungen aufweisen. Am praktischen Beispiel bedeutet dies, daß man die "Handkreuzschneidtische", die "Hand-Streifentische", die "Mechanischen Drehschneidtische"¹⁾ etc. für die Bearbeitung von Fensterglas (Bauglas) kapazitativ addieren kann, während das Schneiden von Dick- und Dünn Glas besondere Schneidtische und damit die Erfassung in eigenen Kapazitäts-(un-)gleichungen erfordert.

1) Hierbei handelt es sich nur um einige der vorhandenen Arten von Schneidtischen, die zur Bearbeitung von TAFELGLAS verwendet werden können.

Weist nun ein Artikel auf dieser Produktionsstufe, hier z.B. Schneiden, keine Bindungen auf, d.h. er kann auf jeder beliebigen Anlage bearbeitet werden, so muß er planungstechnisch irgendeiner Anlage zugeordnet werden.

Liegen für bestimmte Produktarten x_k Mengenbeschränkungen vor, so läßt sich dies durch eine zusätzliche Nebenbedingung erfassen. Dies soll aber in unserem Falle erst dann geschehen, wenn wir vom wirtschaftlichen Optimum ausgehend, die Besonderheiten des Absatzes berücksichtigen wollen.

Sind zwei Produktionsstufen kapazitätsmäßig genau aufeinander ausgerichtet und werden sie von den Produkten jeweils in gleichem Maße beansprucht, so genügt es, dafür nur eine Restriktion zu formulieren.¹⁾ Das trifft bei uns für den Komplex Gemengehaus-Wanne-Ziehmaschinen zu. Die Wanne und die Gemengezubereitung sind weitgehend abhängig von der Kapazität der Ziehmaschinen und auch auf diese eingestellt, so daß es genügt, letztere zu erfassen.

Wir haben bisher nicht versucht, den Begriff der Kapazität näher zu definieren. Das soll nicht bedeuten, daß wir uns über die Problematik dieses Begriffes nicht im klaren sind.²⁾ In unserem Fall wird diese Problematik etwas vereinfacht, weil wir von dem normalen Leistungsvermögen eines Betriebsmittels oder einer Arbeitsstätte innerhalb des Planungszeitraumes, gemessen in Zeiteinheiten, ausgehen können.³⁾

1) Vgl. Rühli, E.: a.a.O., S. 48/49

2) Vgl. insbesondere Kern, W.: Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung. Köln - Opladen 1962

3) Vgl. Kern, W.: Die Messung ..., a.a.O., S. 27

So bestimmen wir, daß etwa die Kapazität der Ziehmaschinen 24 Stunden abzüglich durchschnittlichem Stillstand pro Tag beträgt. In diesem Zeitraum kann dann je nach der Dicke verschieden viel Glas produziert werden, da die Geschwindigkeit der Ziehmaschinen zur Dicke in einem funktionalen Verhältnis steht. Für jede Dicke läßt sich dann der a-Koeffizient für eine Planungseinheit bilden, wobei a die Zeit angibt, die zur Produktion einer Planungseinheit benötigt wird.

Für das Schneidhaus erhalten wir die Kapazität in Minuten oder Stunden durch die Addition der Zeit, die die verschiedenen Schneidvorrichtungen für die Planungsperiode normal zur Verfügung stehen.

Der a-Koeffizient errechnet sich aus der Zeit, die jede Produktart zum Schneiden auf den verschiedenen Schneidischen bei einem normalen Leistungsgrad (nach REFA) benötigt. Die Zeitaufnahmen für die einzelnen Schneidvorrichtungen existieren bereits, da sie als Grundlage der Lohnzahlung Verwendung finden.

In der Packerei lassen sich ähnliche Überlegungen für die Packgruppen und Kistengruppen anstellen. Zeitaufnahmen über die Verpackung der einzelnen Produktarten existieren ebenfalls, bzw. sind ohne Schwierigkeiten möglich.

4. Die Analyse der Produktionszusammenhänge

Aus den vorangegangenen Erörterungen der Grundvoraussetzungen läßt sich unschwer ersehen, daß zur Ermittlung der einzelnen Koeffizienten eine systematische Analyse der Produktionszusammenhänge und -abläufe notwendig ist. Üblicherweise verwendet man zur übersichtlichen Darstellung ein Ablaufdiagramm. Verfahrenstechnisch müssen die

Produktionszusammenhänge in ein System linearer Un- bzw. Gleichungen gebracht werden.¹⁾ Praktisch setzt dies die Ermittlung der variablen Einzel- und Gemeinkosten sowie die Bestimmung der Bearbeitungszeiten pro Prozeß der einzelnen Sorten voraus. Die Ergebnisse werden als Koeffizienten zur Formulierung der Produktionszusammenhänge ins aufzustellende Gleichungssystem übernommen.²⁾ Unserer Analyse der Produktionszusammenhänge legen wir eine vereinfachte Unternehmensstruktur der Glasfabrik zugrunde, ohne dabei die wesentlichen Probleme zu vernachlässigen. Die Ursache hierfür liegt einmal darin, daß wir aus Gründen der Übersicht eine zu große Vielfalt vermeiden wollen, der Rahmen dieser Arbeit zum anderen sich nicht nur auf dieses Problem erstreckt und damit nur ein begrenzter Raum zur Verfügung steht und zum letzten und wichtigsten die Erfassung der wirklichen Verhältnisse ohne Einsatz einer Rechenanlage und der Mitwirkung eines ganzen Operations Research-Teams nicht gewährleistet erscheint.

So wollen wir, anstatt von 9 Ziehmaschinen mit unterschiedlichen Breiten von nur einer ausgehen. Darauf wollen wir nur drei verschiedene Sorten (Dicken) ziehen, nämlich Dick-, Bau- und Dünnglas, die wiederum nur auf bestimmten Schneidtischen zu je zwei Flächengrößen weiterverarbeitet werden.

In Wirklichkeit werden die einzelnen Sorten nicht nur hintereinander, sondern auch nebeneinander gezogen. Das Schneiden bezieht sich dabei auf eine sehr große Anzahl von verschiedenen Tafelgrößen, die von der kleinen Fotoplatte bis zum riesigen Schaufenster reicht und ebenso

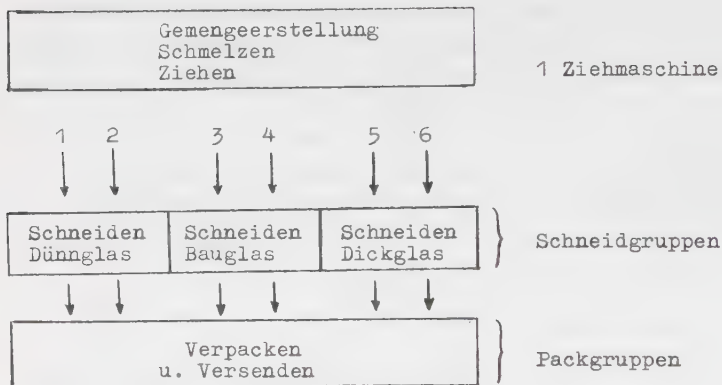
1) Vgl. Wittmann, W.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 12/13

2) Vgl. Dischner, K.-H.: Die Bestimmung ..., a.a.O., S. 17/18

ergeben sich dabei relativ viele unterschiedliche Verpackungsmöglichkeiten.

All diese Daten zu erfassen, ist zwar ein großes Arbeits- und Organisationsproblem, ändert aber nichts am vereinfacht dargestellten Problem an sich.

In der schematischen Darstellung ergibt sich dann das folgende vereinfachte Bild:



Mit der Analyse der Produktionsabläufe erfolgt parallel eine Aufnahme der Bearbeitungszeiten, die in einer Tabelle des zeitlichen Produktionsablaufes je Sorte zusammengestellt werden. Damit ist eine Übersicht über den Produktionsweg wie auch über den Zeitbedarf in den einzelnen Produktionsphasen pro Sorte vorhanden.

5. Das Rechnen in Zeitmengen

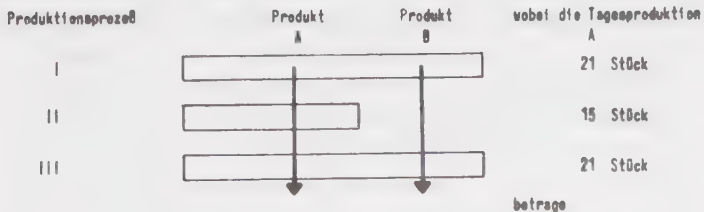
Eine weitere verfahrenstechnische Voraussetzung, die schon bei der Betrachtung über die Kapazitäten kurz angesprochen worden ist, besteht in der Rechnung mit Zeit-

mengen. Dieser Voraussetzung liegt folgender Gedanken-
gang zugrunde.¹⁾

Wenn zur Herstellung von zwei Produkten A und B drei
Produktions"prozesse" I, II und III benötigt werden und
für A ein Deckungsbeitrag²⁾ von DM 10.-- und für B ein
solcher von DM 100.-- erzielt wird, so ist man geneigt,
die Produktion von A zu Gunsten von B zurückzustellen.
Bezieht man in die Überlegung aber die Zeit mit ein und
nimmt man an, daß an Stelle eines Produktes B 15 Produk-
te A gefertigt werden können, so wird sich die Herstel-
lung allein auf A beschränken und B nicht produziert
werden.

Ist weiter bekannt, daß zur Bearbeitung von B der Produk-
tionsprozeß II nicht gebraucht wird, dieser aber für die
Produktion von A einen Engpaß bildet, so wird bei den
Prozessen I und III freie Kapazität vorhanden sein, die
zur Herstellung von B verwendet werden kann.

Dabei ergibt sich folgender schematischer Produktions-
ablauf:



Verhalten sich nun die Prozeßzeiten der Produkte A und
B in jeder Arbeitsphase des Produktionsprozesses I und

1) Die weiteren Überlegungen erfolgen in Anlehnung an
Dischner, K.-H.: a.a.O., S. 18 - 21

2) Unter Deckungsbeitrag wird hier Erlös ./.. variable
Kosten pro Produkt verstanden.

III wie 1 : 15, so ergibt sich die Produktmenge für die Restkapazität von I und III mit 0,4 B pro Tag.¹⁾

Die gewinnmaximale Kapazitätsausnutzung einer Produktionsfaktorenkombination bei alternativer Herstellungsmöglichkeit zweier Produkte A und B beträgt dann

Produktionsprozeß \ Tagesleistung	Produkt A	Produkt B
I	15	0,4
II	15	-
III	15	0,4
Deckungsbeitrag	DM 10,--	DM 100,--
Deckungsbeitrag/Tag	DM 150,--	DM 40,--

Aus dieser Überlegung kann abgeleitet werden, daß die optimale Kapazitätsausnutzung einer Produktionsanlage bei zeitlich ungleicher Kapazitätsbeanspruchung je Produkt eindeutig durch den Deckungsbeitrag/Tag bestimmbar ist. Das Auffinden des höchsten Tagesdeckungsbeitrages für die gesamte Produktionsanlage erfolgt im Prinzip so, daß das Produkt, das den höchsten Gewinn pro Zeiteinheit ergibt, in der Menge herzustellen ist, die die Maschine (Produktionsprozeß) mit der kleinsten Kapazität in der entsprechenden Zeit ausstoßen kann (Engpaß). Die freien Kapazitätsreste der übrigen Maschinen (Produktionsprozesse) müssen dann demjenigen Produkt zur Verfügung gestellt werden, welches

- a) mit den betreffenden Maschinen verarbeitet werden kann und
- b) den zweithöchsten Tagesdeckungsbeitrag ergibt.

1) Dies ergibt sich aus der Differenz von 21 $\cdot$ 15 Stück A der Produktionsprozesse I/III zu II unter Berücksichtigung der Produktionszeitverhältnisse.

Aus obigen Überlegungen resultiert dann die verfahrenstechnische Besonderheit, daß zur Aufteilung der verfügbaren Kapazität nicht mehr Stückmengen als Maßeinheit, sondern Zeitmengen verwendet werden. Es muß weiter darauf hingewiesen werden, daß nicht immer ein gleiches Verhältnis der Zeitanprüche für die Produktarten innerhalb der einzelnen Produktionsprozesse angenommen werden kann. Ein Wegfall dieser Bedingung kompliziert die Lösung nicht unwesentlich. Ebenso ist es unrealistisch, von nur zwei Produkten auszugehen; in der betrieblichen Wirklichkeit gibt es nicht selten hunderte, ja tausende Produkte, so daß sehr bald der klare Überblick verloren geht. Es mußte daher ein Verfahren entwickelt werden, das auch bei solch unübersichtlichen Situationen nach formalen Regeln eine Lösung ermöglicht.

Dies ist mit der sogenannten Programmplanung in Verbindung mit der Simplexmethode geschehen.

Bevor wir uns nun der praktischen Durchführung der Programmplanung der Glasfabrik widmen, sollen alle für die Optimierung derselben bedeutsamen Faktoren noch einmal zusammenfassend herausgestellt werden. Dabei hat sich als wesentlich erwiesen, daß:

- (1) mehrere Sorten hergestellt werden,
- (2) die Herstellung und phasenweise Bearbeitung in Teilprozessen erfolgt, die in Reihen geschaltet sind,
- (3) die Mengen der Sorten durch bestimmte Produktionsengpässe begrenzt sind,
- (4) die Durchlaufzeiten der Sorten in den verschiedenen Teilprozessen unterschiedliche Werte aufweisen,
- (5) das zu realisierende Sortenprogramm durch die gewinnmaximalen Sorten einerseits und die Anzahl der Engpässe andererseits eindeutig bestimmt wird.^{1) 2)}

1) Vgl. Dischner, K.-H.: a.a.O., S. 31

2) Fußnote siehe Seite 266

II. Die praktische Anwendung am Beispiel der Glasfabrik

1. Fertigungsprogramm, Fertigungstechnik und Kapazität der Anlagen¹⁾

Das Fertigungsprogramm besteht aus einer Vielzahl großer und kleiner Glastafeln verschiedener Dicke. Für die grundsätzliche Betrachtung genügt es dabei, von drei Grunddicken auszugehen.

Die Fertigungstechnik ist das sogenannte FOURCAULT-Verfahren, das im glastechnischen Teil dieser Arbeit näher beschrieben worden ist. An Aktivitäten (Produktionsprozessen) können wir Ziehen, Schneiden und Packen unter-

2) Fußnote von Seite 265:

Die lineare Programmplanung - wie sie in den folgenden Abschnitten dargestellt wird - zeigt die sowohl praktisch (Verrechnungspreise) als auch theoretisch und methodengeschichtlich (Wertzurechnung) interessante Eigenschaft der Zurechnung von Erfolgselementen auf die beteiligten Leistungseinheiten knapper Kapazitäten. Vgl. hierzu auch das Beispiel bei Böhm, H.-H.: Operationenforschung - Moderne Vorbereitung unternehmerischer Entscheidungen. Berlin - Baden-Baden 1961, S. 45 - 76.

Wie Opfermann-Reinermann an Hand eines schon von Schmalenbach konzipierten Beispiels (Zinkbeispiel) beweisen - vgl. Schmalenbach, E.: Pretiale Wirtschaftsführung. Bd. 1. Die optimale Geltungszahl. Bremen-Horn 1947, S. 66 - bestehen zwischen den Überlegungen Schmalenbachs und den Untersuchungen mit Linear Programming grundlegende Übereinstimmungen. Nur konnte Schmalenbach sein damaliges Beispiel auf praktische Fälle mangels eines mathematischen Instrumentariums nicht ausdehnen (vgl. ders.: a.a.O., S. 69). - Vgl. Opfermann, K. - Reinermann, H.: Opportunitätskosten, Schattenpreise und optimale Geltungszahl. Ein Vergleich klassischer und moderner Optimalkalküle. In: ZfB 1965 (35), S. 211 - 236, besonders S. 230 - 235 sowie unsere Ausführungen Teil 2/C/II/4 S. 279

- 1) Bei dem folgenden Kapitel können wir uns an die allgemeinen Überlegungen bei Dischner, K.-H.: a.a.O., S. 50 ff. anlehnen, der das optimale Fertigungsprogramm bei einer Bonbonfabrik bestimmt. Vgl. auch Rühli, E.: a.a.O., S. 24 ff. für die Fertigungsprogrammbestimmung eines pharmazeutischen Werkes.

scheiden; die Aktivität "Ziehen" schließt die Gemengeaufbereitung und den Wannenkomplex mit ein, da jene auf den Engpaß Ziehen abgestimmt sind.

Die Kapazität der Anlage soll in Kapazitätsminuten angegeben werden. Dazu ist es notwendig, einen bestimmten Planungszeitraum herauszugreifen. Für unser vereinfachtes Beispiel wollen wir von 10 Tagen ausgehen. Die verfügbare Kapazität ist dann so auf die konkurrierenden Sorten aufzuteilen, daß sich ein maximaler Deckungsbeitrag ergibt. Dabei verlangen die unterschiedlichen Produktionszeiten der einzelnen Sorten für die Kapazitätsverteilung eine Bestimmung der verfügbaren Kapazität in (Kapazitäts-)Minuten. Eine Aktivität (Verarbeitungsphase - Produktionsprozeß - Kostenstelle¹⁾) ist in der Lage, eine für alle Sorten konstante Menge in jeweils unterschiedlicher Zeit zu verarbeiten. Da es nicht immer möglich ist, die unterschiedlichen Erzeugnisse zu addieren, kann die Kapazität einer Kostenstelle nicht in der Ausbringung gemessen werden, sondern ist in den zur Verfügung stehenden effektiven Arbeitszeiten anzugeben. Die zur Verarbeitung verschiedener Sorten notwendigen Zeiten können addiert und im Rahmen der gegebenen Voraussetzungen für die Verarbeitung der noch zu bestimmenden Mengen verteilt werden. Dazu sind dann die wirklich verfügbaren Arbeitszeiten der Menschen und Maschinen für die Planperiode zu ermitteln. Wesentlich ist die Überlegung, ob die Leistungen der Arbeitskräfte die kapazitätsbestimmenden Faktoren sind oder die Maschinen, an denen sie arbeiten, den Arbeitstakt vorschreiben. Der Arbeitstakt der

1) Die Aktivität ist mit der unter abrechnungstechnischen Gesichtspunkten gebildeten Kostenstelle vergleichbar. Während erstere eine mehr dynamische Zeit-Mengen-Betrachtung darstellt, werden bei letzterer die bewerteten Zeit-Mengen-Vorgänge statisch und räumlich interpretiert. Dieser Zusammenhang erlaubt uns im folgenden auch, die uns geläufigere Kostenstellenbezeichnung zu verwenden.

"Abbrecher" auf der Ziehbühne wird weitgehend vom Arbeitstakt der Ziehmaschine bestimmt, während im Schneidhaus und der Packerei die Arbeitszeit auf die durchschnittliche physische Normalleistung des Menschen bezogen werden muß. Die Arbeitszeit der letzten beiden Kostenstellen muß aufgrund von Ausfällen und Arbeitspausen mit der 55-Minuten-Stunde angesetzt werden. Für Überwachungsaufgaben werden pro Stunde 60 Minuten angerechnet.

Somit bestehen als zeitliche Voraussetzung für die Kapazitätsmessung:

- (1) Die Planperiode erstreckt sich auf 10 Tage.
- (2) An einem Arbeitstag sind 8 Stunden bei einschichtigem Betrieb produktiv verfügbar bzw. 24 Stunden bei Dauerbetrieb.
- (3) Ist eine Maschine der dominierende kapazitätsbestimmende Faktor, so sind allgemein 8 bzw. 24 Stunden gleich 8 bzw. 24 effektiv verfügbare Plan-Arbeitsstunden pro Arbeitstag. Bei den Ziehmaschinen muß noch die Lebensdauer beachtet werden. Jede Maschine läuft nämlich nur eine bestimmte, nicht genau vorsehbare Zeit und wird dann freiwillig gestoppt oder "stürzt" infolge unterschiedlicher Ursachen von selbst. Dieser Ausfall, im einzelnen nicht vorherzusehen und unsicher, kann bei der Betrachtung für mehrere Maschinen und in der, auf Vergangenheitswerten aufbauenden, Vorausschau über einen längeren Zeitraum planungstechnisch mit Durchschnittswerten erfaßt werden und reduziert den Zeitansatz der verfügbaren Maschinenkapazität um einen berechenbaren Prozentsatz.

Für das vereinfachte Beispiel wollen wir im Planungsansatz für Ziehen daher von einer Tageskapazität von 21 Stunden ausgehen und nicht von den effektiv vorhandenen 24 Stunden.

- (4) Ist die Arbeitsleistung des Menschen kapazitätsbestimmend, wie im Schneidhaus und in der Packerei, so

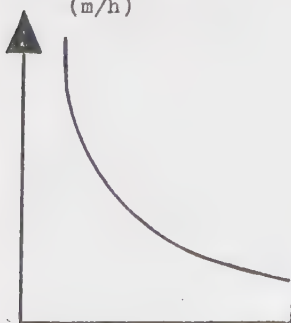
stehen im Einschichtbetrieb pro Arbeitstag, bedingt durch Pausen und sonstige Ausfälle, effektiv 440 Minuten pro Mann bzw. Packgruppe zur Verfügung.

- (5) Stehen in einer Arbeitsphase (Kostenstelle) mehrere gleiche Maschinen oder Arbeiter¹⁾, so addiert sich die effektive Planarbeitszeit entsprechend der Anzahl der Maschinen oder Arbeiter.
- (6) Die in die Rechnung eingehenden Konstanten: Zeitwerte pro Sorte und Kostenstelle beziehen sich auf die Verarbeitung einer gleichen Menge je Sorte.
- (7) Die technischen Koeffizienten der einzelnen Verarbeitungsphasen werden in Minuten pro Einheit ausgedrückt.

2. Die Bestimmung der technischen Koeffizienten

Die technischen Koeffizienten der Ziehanlage ergeben sich aus der Abhängigkeit der einzelnen Glasdicken von der Ziehgeschwindigkeit, d.h. bei einer Geschwindigkeit y werden x laufende Meter einer bestimmten Glasdicke gezogen. Das Verhältnis der Ziehgeschwindigkeit zur Dicke des Glases ergibt folgende Kurve:

Geschwindigkeit
(m/h)



Glasdicke (mm)

Ziehgeschwindigkeit in Abhängigkeit zur Glasdicke²⁾

Quelle: Nach Unterlagen der Glasfabrik vom Autor ermittelt

1) 2) Fußnoten siehe Seite 270

Aus dieser Kurve lassen sich nun ohne weiteres die technischen Koeffizienten ablesen. Fraglich ist nur, auf welche Mengeneinheit wir die technischen Koeffizienten beziehen. Hierzu diene folgende Überlegung.

Bezugsgrundlage aller Mengenberechnungen innerhalb der Glasfabrik ist der Basisquadratmeter ED [1,8 - 2,0 mm]. Alle anderen Dicken werden mit Hilfe von Äquivalenzziffern auf diese Grundlage umgerechnet. Allerdings verhalten sich diese Äquivalenzziffern nicht genau proportional zu den Dicken. Für unsere Berechnungen bleibt nun die Wahl zwischen zwei Möglichkeiten. Im vereinfachten Beispiel genügt es, wenn wir uns an die fabriküblichen Äquivalenzziffern halten, zumal wir bisher eine genaue Dickenbestimmung vermieden haben. Für ein realistisches Modell wäre allerdings eine genaue Proportionalisierung notwendig. Als Bezugsgrundlage sollen uns weiter 48 Basisquadratmeter ED¹⁾ dienen. Dies ist der durchschnittliche Inhalt einer (Glas-)Kiste.²⁾ Daß sich aufgrund der

1) Fußnote von Seite 269:

Natürlich gibt es keine zwei Arbeiter mit immer gleichem Leistungsvermögen/Tag oder Woche. Aber es läßt sich unseres Erachtens eine durchschnittliche physische Leistung des Menschen für eine entsprechende Arbeit ermitteln. Von dieser wollen wir in unserem Planungsansatz ausgehen. Ähnliches geschieht bei der Zeitenvorgabe mit Hilfe von REFA-Zeitaufnahmen.

2) Fußnote von Seite 269:

Bei extremen Breiten ist auch hierfür noch ein Leistungsabfall zu berücksichtigen. Vgl. hierzu Beyersdorfer, P.: Glashüttenkunde. Leipzig 1964, S. 180. Dies wird in unserem Ansatz vernachlässigt.

1) Wir haben diese Bezugsgrundlage gewählt, weil sie sich am einfachen Beispiel relativ leicht "durchspielen" läßt. Für eine wirklichkeitsnahe Basis müßte man auf eine Kubikmeter-Verrechnung übergehen.

2) Hiervon gibt es natürlich Ausnahmen, besonders im oberen und unteren Glasdickenbereich und im Exportgeschäft. Neuerdings gewinnt auch die Versendung auf "Böcken" immer mehr Bedeutung, mit höheren - gewöhnlich vielfachen - Versandeinheiten des Kistengeschäfts. Als Ausweg bleibt hier noch immer die Möglichkeit, auf eine willkürliche Kubikmeter-Basis aus-

Fortsetzung siehe Seite 271

verschiedenen Abmessungen nicht immer genau 48 Basisquadratmeter pro Kiste bestimmen lassen, ist offensichtlich und kann unter Planungsgesichtspunkten in Kauf genommen werden, da sich im Ganzen gesehen ein Ausgleich von Über- und Unterdeckung einstellt.

Als technischer Koeffizient für 48 qm ED Bauglas ergibt sich bei 1,50 m Nutzbreite¹⁾ und der Ziehgeschwindigkeit von 120 m/h mit

$$\frac{48}{1,50} \cdot \frac{60}{120} = 16 \text{ Min.}^{2)}$$

Für das Dünnglas erhalten wir bei einer Ziehgeschwindigkeit von 300 m/h und der Äquivalenzziffer 0,6 einen Koeffizient von

$$\frac{48}{1,5 \cdot 0,6} \cdot \frac{60}{300} = 10,66 \approx 11 \text{ Minuten (zur Erleichterung der Rechnung)}$$

pro 48 Basisquadratmeter Dünnglas.

Für Dickglas ergibt sich bei einer Ziehgeschwindigkeit von 30 m/h und der Äquivalenzziffer zwei ein Koeffizient von

$$\frac{48}{2 \cdot 1,5} \cdot \frac{60}{30} = 32 \text{ Minuten.}$$

Die formulierte Nebenbedingung würde dann lauten

2) Fortsetzung von Seite 270:

zuweichen - (etwa 50 oder 100 cbm). Dies ist aber kein Problem einer absoluten Anwendungsmöglichkeit, sondern nur der relativen, mit der Auswahl der vernünftigsten Bezugsgröße.

- 1) Die Nutzbreite entsteht durch Wegfall der längsseitigen Borte aus der Ziehbreite.
- 2) Die technischen Koeffizienten sind zwar an der Wirklichkeit orientiert, aber nach rechentechnischen Gesichtspunkten ausgewählt worden.

$$11 x_1 + 11 x_2 + 16 x_3 + 16 x_4 + 32 x_5 + 32 x_6 \leq 12600^{1)},$$

wobei x_1 und x_2 , x_3 und x_4 , x_5 und x_6 immer verschiedene Abmessungen der Sorten Dünnglas, Bauglas und Dickglas darstellen und 12600 Minuten die effektiv vorhandene Kapazität in der Planungsperiode bedeuten.

Im Schneidhaus stehen für die Verarbeitung der einzelnen Sorten Schneidtische in unterschiedlicher Anzahl zur Verfügung. Das Schneiden der zwei Sortenabmessungen beansprucht verschiedene Zeiten. Insgesamt sind nur jeweils begrenzte Schneidkapazitäten für die einzelnen Sorten verfügbar.

Für das Dünnglas werden zwei Schneidtische mit 8 x 55 Minuten Tagesarbeitszeit veranschlagt; für Bauglas drei und für Dickglas wiederum zwei Schneidtische. Die technischen Koeffizienten sollen für

Dünnglas		Bauglas		Dickglas	
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
30	40	35	45	50	60

Minuten pro Planungseinheit betragen.

Die vorhandenen Schneidkapazitäten sind für

	Dünnglas- schneiden	Bauglas- schneiden	Dickglas- schneiden
in der Planungs- periode	8800	13200	8800

Minuten.

In der Packerei bestehen 4 Packgruppen mit einer Kapazität von insgesamt 17500 Minuten. Die technischen Koeffizienten für die Verpackung der einzelnen Sortengrößen sollen

¹⁾ Die Ziehmaschine ist durchgängig während der Planungsperiode in Betrieb. Der Abschlag ergibt sich aus der Berücksichtigung durchschnittlicher Ausfallzeiten.

Dünnglas		Bauglas		Dickglas		
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	
18	23	24	26	31	33	Minuten pro Planungseinheit sein. ¹⁾

Die technischen Koeffizienten ergeben mit ihren Kapazitäten zusammengefaßt folgende Matrix:

$$\begin{aligned}
 11 x_1 + 11 x_2 + 16 x_3 + 16 x_4 + 32 x_5 + 32 x_6 &\leq 12600 & 2) \\
 30 x_1 + 40 x_2 &\leq 8800 \\
 35 x_3 + 45 x_4 &\leq 13200 \\
 50 x_5 + 60 x_6 &\leq 8800 \\
 18 x_1 + 23 x_2 + 24 x_3 + 26 x_4 + 31 x_5 + 33 x_6 &\leq 17600
 \end{aligned}$$

Zur Berechnung eines optimalen Fertigungsprogramms bedarf es noch eines Bewertungskriteriums. Es besteht im Deckungsbeitrag des Produktes; die Summe der Deckungsbeiträge soll insgesamt ein Maximum ergeben.

3. Die Bestimmung der Deckungsbeiträge

Die Deckungsbeiträge der einzelnen Sorten errechnen sich aus dem Stückpreis pro Kiste für eine bestimmte Abmessung und Glasdicke abzüglich der variablen Kosten des jeweiligen Erzeugnisses.

Problematisch erscheint hierbei die Ermittlung der va-

-
- 1) Die technischen Koeffizienten für das Schneiden und Verpacken sind an der Wirklichkeit orientierte Annahmen.
 - 2) Die Ungleichungen können durch Einführung von 6 nicht-negativen Schlupfvariablen $x_7 - x_{12}$ in Gleichungen umgewandelt werden. Es gilt außerdem noch die Nichtnegativitätsbedingung.

riablen Kosten, daher wollen wir sie einer gesonderten Erörterung unterziehen. Dabei ist festzustellen, daß die hier auftretenden Probleme keine speziellen Anwendungsprobleme von Operations Research sind, sondern allgemeine betriebswirtschaftliche Zurechnungsprobleme.

Die einzelnen Möglichkeiten sollen hier, ohne näheren Bezug auf die Glasfabrik, zusammenfassend dargestellt werden.

Wie schon früher angedeutet, muß man zwischen variablen Einzel- und Gemeinkosten unterscheiden, wobei besonders bei der Ermittlung der variablen Gemeinkosten schwierige Zurechnungsprobleme auftreten.

Die Ermittlung der variablen Einzelkosten dürfte hierbei keine besonderen Probleme aufwerfen. Ihre Erfassung könnte sich auf die Kostenarten Material, Lohn¹⁾, Energie und Verpackungsmaterial beziehen.²⁾ Für die Errechnung der variablen Gemeinkosten pro Artikel sind im vorliegenden mehrstufigen Vielproduktbetrieb zwei Rechengänge notwendig:

- (a) Auf jeder Kostenstelle müssen für die jeweiligen Einflußfaktoren³⁾ die variablen Gemeinkosten ermittelt werden.
- (b) Die so ermittelten variablen Gemeinkosten sind anschließend den einzelnen Endprodukten, gemäß ihrem

1) Zeitaufnahmen bilden die Grundlage für die Lohnermittlung. Schwierigkeiten ergeben sich für die stufenfixen Meisterlöhne.

2) Es besteht die Möglichkeit, hierbei die Matrizenrechnung anzuwenden. Dies bezieht sich besonders auf den Materialverbrauch. Voraussetzung ist, daß die verwendeten Mengen streng quantifiziert sind. Dazu ist dann auch die Verwendung einer elektronischen Datenanlage möglich. Im Falle der Glasfabrik erscheint dies aber nicht unbedingt notwendig.

3) Hier speziell Beschäftigung

Anteil¹⁾ an den Einflußfaktoren jeder Kostenstelle, zuzurechnen.

Damit werden für jedes Produkt anteilige variable Gemeinkosten gefunden.

Die Ermittlung der variablen Gemeinkosten in Abhängigkeit von einem Einflußfaktor - also die Trennung in fixe und variable Gemeinkosten - ist in der Literatur im Zusammenhang mit der Ermittlung der Grenzkosten diskutiert worden und soll hier zusammenfassend noch einmal für die Gemeinkostentrennung dargestellt werden:²⁾

(1) Die einfache buchtechnische Methode.

Aufgrund von Erfahrungen der Vergangenheit werden an Hand der Unterlagen der Buchhaltung die einzelnen Kostenarten der Gruppe der fixen oder variablen Kosten zugewiesen. Mischkosten gibt es hierbei nicht.

(2) Die mathematische Methode im Sinne von Schmalenbach.

Schmalenbach will mit seiner "mathematischen Kostenauflösung" die Kosten in fixe und proportionale aufteilen. Der Kostenzuwachs zweier benachbarter Beschäftigungsgrade, d.h. die proportionalen Kosten werden durch den Mengenzuwachs dividiert und bilden die Grenzkosten. Die fixen Kosten ergeben sich als Differenz zwischen den bei einem bestimmten Beschäftigungsgrad anfallenden Gesamtkosten und den bei diesem Beschäftigungsgrad ermittelten Grenzkosten, multipliziert mit der entsprechenden Stückzahl.

(3) Die mathematisch-statistische Methode mit Hilfe der Regressionsanalyse.

Auszugehen ist hierbei von bereinigten Zahlenpaaren;

1) Eine Zuordnung wäre in unserem speziellen Fall mit Hilfe von Äquivalenzziffern pro Kostenstelle ohne weiteres möglich.

2) Im folgenden in Anlehnung an Mawick, P.: a.a.O., S. 46 - 54

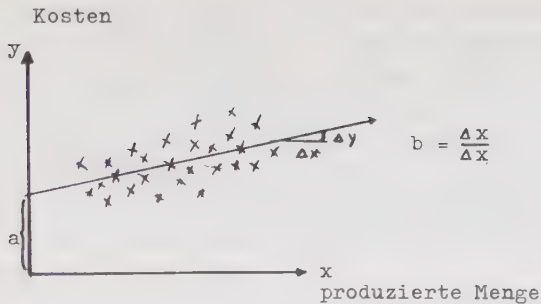
z.B. muß eine Bereinigung der Einflüsse aus unterschiedlichen Kapazitäten, Lohnтарifen, Preisen, Entlohnungsarten oder sonstigen Veränderungen der Anlagen erfolgen.¹⁾ Diese Wertepaare werden nun in ein Diagramm eingetragen und für jede Kostenstelle wird versucht, eine Trennung von variablen und fixen Kosten mit Hilfe der im folgenden zu beschreibenden Regressionsanalyse vorzunehmen.

Verfügt man im Betrieb über genügend Wertepaare x und y , so lassen sich die Größen untenstehender Abbildung a und b mit Hilfe der Regressionsanalyse²⁾ bestimmen.

1) Auszuschalten sind hier alle Einflüsse, die das direkte Verhältnis zwischen Kosten und Beschäftigung beeinflussen. Die angegebenen Bereinigungen stellen nur eine geringe Anzahl möglicher Beeinflussungen dar. Eine Zusammenstellung findet sich bei Lassmann, G.: Die Produktionsfunktion und ihre Bedeutung für die betriebswirtschaftliche Kostentheorie. Beitrag zur betriebswirtschaftlichen Forschung. Bd. 6, Köln - Opladen 1958, S. 115, mit der er seine Kritik an Henzel, F.: Kosten und Leistung. 2. neubearb. Auflage der Kostenanalyse, Bühl-Baden 1941, zusammenfaßt, weil dieser eine Eliminierung dieser Einflußfaktoren bei seinen Kostenuntersuchungen unterlassen hat.

Vgl. dazu auch die Untersuchungen Böhmer, E.: Industriebetriebliche Kostenkurven und ihre Bedeutung für die Preispolitik. Diss. Mainz 1951, S. 35 - 94 und Henschel, A.: Kostenverlauf bei schwankender Massenproduktion in einem Betrieb mit einfacher und kombinierter Fertigung. Diss. Bonn 1951, die zu einem linearen Verlauf der Gesamtkostenkurve mit Hilfe der Regressionsanalyse kommen.

2) Vgl. dazu die statistische Fachliteratur:
Linder, A.: Statistische Methoden. 2. Aufl., Basel 1951, S. 27 - 34;
Lyle, P.: Regression Analysis of Production Costs and Factory Operations. 3rd Edition: Revised by Tippet, L.H.C., London 1957, S. 22 - 26



Dabei können ein oder mehrere Einflußfaktoren x auftreten. Zwischen Einflußfaktoren x und der abhängigen Variablen y , deren Werte aus dem empirischen Datenmaterial eines untersuchten Betriebes entnommen sind, besteht ein stochastischer Zusammenhang. Das bedeutet, daß die effektiven y -Werte von ihren Erwartungswerten Y zufällig abweichen. Durch die geeignete Wahl von Parametern ist nun eine möglichst günstige funktionale Abhängigkeit dieser Größen zu finden. Im Falle der einfachen linearen Regression wären beispielsweise für die Gleichung

$$(1) \quad Y = a + bx$$

die Parameter a und b zu schätzen. Die Schätzung dieser Parameter erhält man durch die Werte, die die Summe aller Quadrate zwischen effektiven und Erwartungswerten zum Minimum machen:

$$(2) \quad \sum (y_i - Y_i)^2 = \text{Minimum}$$

Aus dieser Beziehung erhalten wir folgende Berechnungsformel für die beiden Parameter:

Y aus (1) wird in (2) gesetzt und ergibt

$$(3) \quad \sum (y_i - a - bx_i)^2 = \text{Minimum}$$

Leiten wir daraus a und b ab und setzen das Ergebnis

Null, so finden sich für die beiden Parameter folgende Berechnungsformeln:

$$(4) \quad a = \bar{y} - b\bar{x} \quad \text{wobei für } \bar{x} \text{ und } \bar{y} \text{ analog gilt:}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N x_i$$

$$(5) \quad b = \frac{\sum x_i y_i - \bar{y} \sum x_i}{\sum x_i^2 - \bar{x} \sum x_i}$$

Sind - wie oben - die y-Werte die Kosten und die x-Werte die Produktionsmengen, so bedeuten die nachstehenden Größen:

y = Durchschnittliche Totalkosten einer Einheitsperiode

x = Durchschnittliche Produktionsmenge einer Einheitsperiode

Y_i = Betrag, den die Kosten der Einheitsperiode mit der größten Wahrscheinlichkeit annehmen, wenn die Produktionsmenge x_i beträgt.

(4) Die analytische Methode.

Sie fußt auf den Überlegungen, die über die Verbrauchsfunktionen zu einer linearen Gesamtkostenfunktion führen. Diese sollen im einzelnen nicht noch einmal dargelegt werden. Interessant ist, daß auch im amerikanischen Forschungsbericht über "Direct Costing"¹⁾ von technisch-betriebswirtschaftlichen Untersuchungen, also von der analytischen Methode, zur Kostentrennung ausgegangen wird. Neben dieser finden aber auch dort die buchtechnische Methode und die Regressionsanalyse Anwendung.

1) Vgl. RKW: Das Rechnen mit Grenzkosten. Ohne Ort 1960. Übersetzung eines amerikanischen Forschungsberichts der National Association of Accountants (NAAC) "Direct Costing". S. 22/23

Nach der Trennung von fixen und variablen Gemeinkosten lassen sich aus den Einzelkosten und den auf die Kostenträger aufgeschlüsselten variablen Gemeinkosten die gesamten variablen Stückkosten der einzelnen Sorten ermitteln. Aus der Differenz von Erlös und variablen Kosten ergeben sich dann die sogenannten Deckungsbeiträge der einzelnen Sorten, die in der Zielfunktion insgesamt maximiert werden sollen. Die zugehörige Zielfunktion lautet:

$40 x_1 + 50 x_2 + 30 x_3 + 55 x_4 + 65 x_5 + 75 x_6 \Rightarrow \text{Maximum}$,
wobei die Koeffizienten die Deckungsbeiträge wiedergeben.

Die Summe der Deckungsbeiträge der günstigsten Sortenkombination soll dabei den Fixkostenblock mindestens abdecken.

Die optimale Sortenkombination braucht möglicherweise nicht alle Produktivfaktoren voll ausnutzen, d.h. es entstehen Leerzeiten. Nach der rechnerischen Ermittlung des optimalen Fertigungsprogrammes müssen die Kosten der Leerzeiten den fixen Gemeinkosten zugeschlagen werden, da sie nicht den Sorten verrechnet werden können. Gleichermäßen sind die Lohnanteile, die für die eingeplante 5-minütige Ausfallzeit pro Arbeitsstunde entstehen, den fixen Gemeinkosten zuzurechnen.

4. Die Ermittlung des wirtschaftlichsten Fertigungsprogramms

Ausgehend von der oben festgelegten Ausgangsmatrix sei das wirtschaftlichste Fertigungsprogramm nach bestimmten Rechenregeln entwickelt.

Die Rechenregeln lauten:¹⁾

- (1) Man suche in der Z-Zeile die größte negative Zahl (- 75). Die Kolonne, in welcher diese Zahl liegt, gilt für Tableau 2 als Schlüsselkolonne.
- (2) Man dividiere zeilenweise alle Zahlen der Lösungskolonne (P_0) durch die entsprechenden Zahlen der Schlüsselkolonne, wobei gilt
 - a) die Z-Zeile wird nicht in diese Operation einbezogen,
 - b) Division durch 0 oder eine negative Zahl ergibt kein gültiges Resultat.

Diejenige Zeile, auf welche das niedrigste Ergebnis entfällt ($8800 : 60 = 166,6$), wird als Schlüsselzeile festgelegt und eingerahmt. Liegen mehrere kleinste Quotienten vor, dann wird nach eigenem Ermessen einer davon ausgewählt. Im Schnittpunkt von Schlüsselzeile und Schlüsselkolonne liegt die als Pivot bezeichnete Zahl. In den folgenden Schritten wird nun die durch die Schlüsselzeile gegebene Basis (x_{10}) "hinausgeworfen" und ersetzt durch die, durch die Schlüsselkolonne bestimmte, neue Variable ($P_6 = x_6$).

- (3) In der bisherigen Schlüsselzeile werden sämtliche Zahlen durch den Pivot dividiert, und die Resultate werden in die entsprechenden Felder eines zweiten Simplextableaus übertragen. Als neue Basis gilt nun x_6 .
- (4) Alle übrigen Zahlen des Tableaus mit Einschluß der Z-Zeile werden nach folgender Formel umgeformt:

$$\begin{aligned} \text{Alte Zahl} &= \frac{\text{Entsprechende Zahl der Schlüsselkolonne}}{\text{Pivot}} \cdot \frac{\text{Entsprechende Zahl der Schlüsselzeile}}{\text{Pivot}} = \\ &= \text{neue Zahl} \end{aligned}$$

1) Vgl. Hürlimann, W.: Lineare Programmierung - Eine Einführung für Nicht-Mathematiker. Zürich - Düsseldorf 1963. S. 10 - 23

Dies ergibt das zweite Simplextableau mit einer verbesserten Lösung.

- (5) Es muß überprüft werden, ob es sich um die optimale Lösung handelt. Das ist der Fall, wenn in der Z-Zeile keine negativen Zahlen, sondern nur positive Zahlen oder Nullen stehen. Wenn nicht, dann beginnt die Prozedur gemäß 1 - 5 von vorn.

Tab. 1 - Ausgangsmatrix

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	1)
Z		-40	-50	-30	-55	-65	-75						
x ₇	12600	11	11	16	16	32	32	1					
x ₈	8800	30	40						1				
x ₉	13200			35	45					1			
x ₁₀	8800					50	60				1		
x ₁₁	17600	18	23	24	26	31	33					1	

Tab. 2 - Ausgangsmatrix als erste Bearbeitungsmatrix

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁
Z		-40	-50	-30	-55	-65	-75					
x ₇	12600	11	11	16	16	32	32	1				
x ₈	8800	30	40						1			
x ₉	13200			35	45					1		
x ₁₀	8800					50	60				1	
x ₁₁	17600	18	23	24	26	31	33					1

1) Die Minuszeichen der Z-Zeile wurden aus rechentechnischen Gründen eingeführt.

Tab. 3

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	X ₁₀	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁
Z	11000	-40	-50	-30	-55	-5/3					5/4	
x ₇	7908	11	11	16	16	80/3		1			-8/15	
x ₈	8800	30	40						1			
x ₉	13200			35	45					1		
x ₆	146,6					5/4	1				1/60	
x ₁₁	12760	18	23	24	26	7/2					-11/20	1

Tab. 4

	P ₀	P ₁	P ₂	P ₃	X ₉	P ₅	X ₁₀	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁
Z	27128,3	-40	-50	$\frac{655}{9}$		-5/3				+11/9	5/4	
x ₇	3215	11	11	14/3		80/3		1		$-\frac{16}{45}$	$-\frac{8}{15}$	
x ₈	8800	30	40						1			
x ₄	293,3			7/9	1					1/45		
x ₆	146,6					5/4	1				1/60	
x ₁₁	5133	18	23	34/9		7/2				$-\frac{26}{45}$	$-\frac{11}{20}$	1

Tab. 5

	P ₀	P ₁	X ₈	P ₃	X ₉	P ₅	X ₁₀	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁
Z	38128,3	-5/2		655/9		-5/3			+5/4	11/9	5/4	
x ₇	795	11/4		14/3		80/3		1	-11/40	-16/45	-8/15	
x ₂	220	3/4	1						1/40			
x ₄	293,3			7/9	1					1/45		
x ₆	146,6					5/4	1				1/60	
x ₁₁	73	3/4		34/9		7/2			-23/40	-26/45	-11/20	1

Tab. 6

	P ₀	X ₁₁	X ₈	P ₃	X ₉	P ₅	X ₁₀	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁
Z	38371,6			$\frac{5605}{63}$		10			$-\frac{4}{6}$	$-\frac{19}{27}$	$-\frac{7}{12}$	$\frac{10}{3}$
x ₇	528			$-\frac{248}{27}$		$\frac{83}{6}$		1	$\frac{22}{12}$	$\frac{238}{135}$	$\frac{89}{60}$	$-\frac{11}{3}$
x ₂	147		1	$-\frac{34}{9}$		-7/2			6/10	$\frac{26}{45}$	$\frac{11}{20}$	-1
x ₄	293,3			7/9	1					1/45		
x ₆	146,6					5/4	1				1/60	
x ₁	97,3	1		$\frac{136}{27}$		$\frac{14}{3}$			$-\frac{23}{30}$	$-\frac{104}{135}$	$-\frac{11}{15}$	$\frac{4}{3}$

Tab. 7

	P ₀	X ₁₁	X ₈	P ₃	X ₉	P ₅	X ₁₀	P ₇	P ₈	X ₂	P ₁₀	P ₁₁
Z	38550,6		$+\frac{95}{78}$	≈47		≈5			+5/78		9/104	165/78
x ₇	≈80		$-\frac{119}{39}$	$+\frac{822}{351}$		$\frac{953}{39}$		1	0,01		-0,19	-8/13
x ₉	254,4		$\frac{45}{26}$	$-\frac{85}{13}$		$-\frac{315}{52}$			$\frac{27}{26}$	1	$\frac{99}{104}$	$-\frac{45}{26}$
x ₄	287,7		-1/26	$\frac{12}{13}$	1	$\frac{7}{52}$					11/520	+1/26
x ₆	146,6						1				1/60	
x ₁	293,3	1	+4/3						1/26			

Ergebnis: x₁ = 293,3; x₄ = 287,7; x₆ = 146,6; Z = 38550,6
=====

Überkapazität bei x₇ (Ziehen) von 80 [Min]

und x₉ (Schneiden II) von [254] Min

Der Kapazitätsvergleich zeigt folgendes Bild:

	Vorhandene Kapazität	Benötigte Kapazität
Ziehen	12 600	12 520
Schneiden I	8 800	8 799
Schneiden II	13 200	12 946
Schneiden III	8 800	8 796
Packen	17 600	17 597

Das Ergebnis zeigt, daß wir von sechs möglichen Produkten nur drei herstellen. Im übrigen ersehen wir, daß wir laut Tableau 7 keine ganzzahlige Lösung erhalten. Wir könnten nun mit Hilfe der "Ganzzahligen Optimierung" Ganzzahligkeit erzielen. In der Praxis empfiehlt es sich aber, die Lösungen aufzurunden, da

- solche Rundungen wegen der relativen Gleichartigkeit der Produkte ohne größere Einwirkungen auf die Lösung leicht möglich sind,
- bei größeren absoluten Zahlenbeispielen solche Rundungen kaum ins Gewicht fallen,¹⁾
- jeder Prozeß innerhalb der hierfür notwendigen Kapazitätsminuten nach oben bzw. unten bestimmt anzupassen ist.

Aus Tableau 7 schließen wir weiter, daß sich beim optimalen Programm bei der Ziehanlage (x_7) eine Leerzeit von 80 Minuten ergibt. Diese Leerzeit würde als Reservekapazität für unvorhergesehene Ausfälle neben der sowieso

1) Wir können in unserem Falle jederzeit von gerundeten Werten ausgehen, ohne das Ergebnis wesentlich zu beeinflussen.

$x_1 = 293$; $x_4 = 288$; $x_6 = 147$. Der Deckungsbeitrag würde sich auf DM 38 585,-- erhöhen und die vorhandenen Kapazitäten zum Teil unwesentlich überschritten werden (z.B. Schneiden III und Packen).

Ziehen:	12 533 Min
Schneiden I:	8 790 Min
Schneiden II:	12 960 Min
Schneiden III:	8 820 Min
Packen:	17 613 Min

geplanten Ausfallzeit zur Verfügung stehen. Beim Schneiden II (x_3) entsteht ebenfalls eine Leerzeit von 254 Minuten. Die Engpässe liegen also beim Schneiden I und III und beim Verpacken. Würde man nun versuchen, diese Engpässe zu beheben, so würde sich unter Umständen ein völlig anderes Fertigungsprogramm ergeben, mit anderen oder gleichen Engpässen. Um das neue Programm festzulegen, bedarf es aber einer völlig neuen Rechnung, denn der Ansatz bezieht sich nicht auf eine einzelne Variable, sondern immer auf das ganze Programm.

In diesem Zusammenhang wollen wir bei der Interpretation der Lösungsmatrix auf ein weiteres interessantes betriebswirtschaftliches Problem hinweisen.¹⁾ Die Spalten der noch vorhandenen Nichtbasisvariablen - bei uns P_8 , P_{10} und P_{11} - haben auch ihre spezielle Bedeutung. Die Ziffern, die bei diesen Spalten in Tab. 7 in der 1. Zeile (Zielfunktion) stehen, stellen mathematisch gesehen Einflüßzahlen und ökonomisch Grenzgewinne dar. Diese Beträge, auf die KOOPMANS²⁾ erstmalig aufmerksam gemacht hat, geben an, um wieviel das Ergebnis sinkt, wenn man die Faktoreinsatzmenge (Kapazitätsstunden), dieser durch das optimale Programm voll ausgelasteten und daher nicht mehr zur Basis gehörenden Fertigungsstelle, um eine Einheit vermindert.

Multiplizieren wir nun die in Zeile 1 der Nichtbasisvariablen P_8 , P_{10} und P_{11} erhaltenen Zahlen mit den in der Anfangsmatrix ausgewiesenen verfügbaren Faktoreinsatzmengen b_i (hier Spalte P_0 Zeile b_8 , b_{10} , b_{11}), so ergibt

1) Vgl. Kern, W.: Operations Research. Eine Einführung ..., a.a.O., S. 52/53

2) Vgl. hierzu im einzelnen Beckmann, M.J.: Lineare Planungsrechnung. Linear Programming. a.a.O., S. 13 - 23, S. 27/28, S. 32/33

sich als Summe das Gesamtergebnis.¹⁾ D.h. diese Zahlen stellen Grenzerfolge dar, mit denen jede der beschränkt zur Verfügung stehenden Kapazitäten bewertet wird. Die Kapazitäten, die bei diesem Programm nicht knapp sind (Ziehen $x_7 = P_7$ und Schneiden II $x_9 = P_9$), werden dagegen als "freie" Güter mit 0 bewertet. Mit diesem Zusammenhang bekommen wir eine neue Möglichkeit der Wertzurechnung von Produktionsfaktoren. Denn diese Grenzerfolge sind betriebswirtschaftlich gesehen einfach innerbetriebliche Verrechnungspreise, die allerdings nur bei diesem bestimmten optimalen Fertigungsprogramm angewandt werden können. BÖHM-WILLE²⁾ gehen von diesen Überlegungen bei ihrer sogenannten Standard-Grenzpreiskalkulation aus.

Die Ermittlung der wirtschaftlichen Produktionsmengen für die Sortenproduktion beruht hier also auf der Anwendung einer Art Grenzkostenrechnung, deren Deckungsbeitrag aus Erlösen abzüglich proportionale Kosten in Verbindung mit der Kapazitätsbeanspruchung als Steuerungselement für die Fertigungsprogrammplanung dient. Die Fixkosten spielen hierbei keine besondere Rolle; sie sollten allerdings in der Gesamtbetrachtung wenigstens auf längere Sicht durch die Summe der Deckungsbeiträge mindestens gedeckt werden.

1) Man multipliziert $8800 \cdot 5/78 + 8800 \cdot 9/104 + 17600 \cdot 165/78$ und erhält als Gesamtergebnis DM 38 555,--. Der Unterschied zum Ergebnis in Tab. 7 ergibt sich daraus, daß beim dort angegebenen Programm Rundungsdifferenzen auftreten, wie sie auch schon beim Vergleich zwischen benötigter und vorhandener Kapazität aufgetreten sind, und wir hier mit offiziell korrekt vorhandenen Kapazitäten arbeiten. Um auf den genauen Betrag zu kommen, müßte man mit den genau vom Programm benötigten, zum Teil abgerundeten, Kapazitäten rechnen.

2) Vgl. Böhm, H.H. - Wille, F.: Direct Costing und Programmplanung. Moderne Kalkulationsverfahren für gewinnoptimale Produktions- und Verkaufsprogramme. München 1960, S. 87 - 100

Das vorliegende Beispiel liefert uns mit Hilfe des Linear Programming und bei Benutzung der Simplexmethode ein Ergebnis, das bei den gegebenen Voraussetzungen eine optimale Kapazitätsverteilung mit maximaler Deckungsbeitragssumme ergibt.

Nun begnügt sich die Literatur über die Anwendung operationsanalytischer Verfahren nach Ermittlung dieses absoluten Optimums damit, der Unternehmung von der Absatzseite her keine Grenzen zu setzen. D.h. es wird unterstellt, daß die Unternehmung ihr optimales Fertigungsprogramm auch ohne Schwierigkeiten absetzen kann.¹⁾ Dies entspricht aber keinesfalls der unternehmerischen Wirklichkeit, denn die externen Verhältnisse haben auf die betrieblichen Umstände einen wesentlichen Einfluß.

Die rechnerische Ermittlung obigen Beispielles hat ohne Berücksichtigung des Absatzes zu dem Ergebnis geführt, daß von sechs möglichen Produkten nur drei produziert worden sind. Dabei ergibt sich der maximale Gewinn. Die drei restlichen Sorten sind aus dem Fertigungsprogramm eliminiert worden. Da aber aus Absatzgesichtspunkten diese Produkte zumindest mit Mindestmengen produziert werden sollen, müssen zusätzliche Bedingungen in die Rechnung aufgenommen werden. Zum anderen sind die Mengenverhältnisse der Sorten untereinander beim ermittelten Fertigungsprogramm eindeutig zu sehr zugunsten der Dünngläser verschoben. D.h. in der Wirklichkeit ist die Produktion auf dem Gebiet der Dünngläser aus produktions- und absatztechnischen Gründen auf eine bestimmte Höchstmenge beschränkt. Deshalb ist eine neue optimale Kapazitätsverteilung unter Berücksichtigung von Mindest- und Höchstmengen vorzunehmen.

1) Vgl. Frenckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre ..., a.a.O., S. 81

Die Bestimmung solcher Mindest- und Höchstmengen erfolgt aufgrund der Verkaufserwartungen oder technischer Produktionsbeschränkungen. Dabei stellen dann die Mindestmengen der einzelnen Sorten die Mengen dar, die in jedem Falle produziert werden müssen, um z.B. eine Verärgerung der Abnehmer, welche gerade auf diese Sorte Wert legen, zu vermeiden, bzw. auch, um einen unnötigen Prestigeverlust zu verhindern. Die Höchstmengen zeigen die obere Grenze der Verkaufserwartungen an bzw. beruhen auf Produktionsbeschränkungen. Erst unter diesen Voraussetzungen wird der Rechnungsansatz markt- und unternehmerischen Überlegungen gerecht.

Die Kenntnis des "absoluten" Optimums nützt dem Glaserzeuger wenig, denn er arbeitet weitgehend in Auftragsfertigung und muß sich daher den Wünschen des Glasgroßhandels und der Direktbezieher anpassen. Das Wissen um sein absolutes Optimum unter Berücksichtigung verschiedener unbeeinflussbarer Faktoren gibt ihm aber die Chance, die Wünsche der Auftraggeber durch Werbung oder Preisgestaltung sowie Gewährung von besonderen Konditionen in seinem Sinne - zu seinem Optimum hin - zu beeinflussen. Erst die Ausschöpfung all dieser Möglichkeiten - sieht man einmal von dem rechentechnischen Fortschritt der neuen Methode ab - erbringt für den Unternehmer eine volle Ausnutzung der Entscheidungshilfe Operations Research bei der Bestimmung eines optimalen Fertigungsprogramms. Betrachtet man die Anwendungsmöglichkeiten unter diesem Gesichtspunkt, so ist es letztlich gleichgültig, ob es sich innerhalb der Anwendung um eine Auftragsfertigung - wie in unserem Beispiel - oder um Fertigung für den anonymen Markt handelt. Produziert man bei letzterer nach dem wirtschaftlich "absoluten" Optimum, so ist die produktionstechnische¹⁾ Seite zwar optimal gelöst, dies

1) Das Wirtschaftlichkeitsdenken und das Bedarfsdeckungsdenken existieren hier eng nebeneinander. Vgl. Böhm, H.H.: Operationenforschung ..., a.a.O., S. 50

sagt aber nichts darüber aus, ob man den Marktanforderungen damit auch gerecht wird.

5. Das modifizierte Fertigungsprogramm durch Berücksichtigung von Mindest- und Höchstmengen

Im folgenden sollen die Möglichkeiten der Berücksichtigung von Mindest- oder Höchstmengen nur angedeutet sowie eine rechentechnische Vereinfachung im Ansatz aufgezeigt werden.

Die Mindest- oder Höchstmengen lassen sich zu den bisher gegebenen Kapazitätsgleichungen in Form von Bedingungsgleichungen hinzufügen. Z.B. $x_1 \geq 50$ und $x_1 \leq 110$.¹⁾ Um den Rechenaufwand hierfür zu ermäßigen, erfassen wir die Mindestmenge in ihrem Zeitaufwand pro Anlage und ziehen diesen von der vorgegebenen Kapazität der Anlage ab.

Am Beispiel der Ziehmaschine bedeutet dies, daß 50 Einheiten x_1 550 Minuten Ziehkapazität in Anspruch nehmen, um die dann die Gesamtziehkapazität reduziert werden muß. Entsprechende Reduzierungen finden auch bei den anderen "Prozeß"-Kapazitäten (Schneiden, Packen) statt, so daß für die optimale Auswahl nur die verbleibende Restkapazität zur Verfügung steht.

Besteht bei einem Produkt sowohl die Forderung nach Mindestmengen (z.B. $x_1 \geq 50$), als auch nach Höchstmengen (z.B. $x_1 \leq 110$), so ist durch Aufrechnung ($110 - 50 = 60$) eine Reduzierung der Bedingungsgleichungen $x_1 \geq 50$ und $x_1 \leq 110$ auf $x_1 \leq 60$ möglich.

Der Ansatz von Mindestmengen führt weiter dazu, daß hiermit eine Unzulänglichkeit der linearen Programmplanung

1) Die rechentechnische Behandlung findet sich im Exkurs Teil 2/D/II

vermieden bzw. reduziert werden kann. Hat man, wie es in der Praxis oft der Fall ist, eine relativ geringe absolute Anzahl von Fertigungsstellen (Produktions"prozeß", Aktivität)¹⁾ $\underline{n}$ (Ziehen, Schneiden ...) bei relativ viel Produktarten $\underline{m}$ ($m > 200$), so führt das beim "absoluten Optimum" dazu, daß höchstens $\underline{n}$ Produktarten gefertigt werden, denn die rechentechnische Lösung beschränkt sich auf höchstens $\underline{n}$ Produktarten. In der Realität ist das aber gewöhnlich viel zu wenig. Die Angabe von Mindestmengen verhindert den Wegfall "weniger guter" Produkte im optimalen Fertigungsprogramm. Durch die Annahme von Mindestmengen wird die vorhandene Kapazität, um die für deren Produktion notwendige Zeit reduziert und die verbleibende auf höchstens $\underline{n}$ Produktarten optimal aufgeteilt. Bei den in der Literatur üblichen kleineren Beispielen mit relativ geringen $\underline{n}$ und $\underline{m}$ fällt dieser rechentechnische Umstand nicht so ins Auge; bei praktischen Lösungen bildet er aber bei geringer Produktionstiefe der Unternehmung eine nicht unwesentliche Grenze.

III. Kritische Überlegungen über die Anwendung der linearen Programmplanung innerhalb der Glasfabrik aufgrund mangelnder Beherrschbarkeit der Produktion

Wir haben bisher vermieden, auf die schon zu Beginn angeführte Qualitätseinteilung näher einzugehen. Bei den kritischen Überlegungen werden wir nicht umhin können, diesem Gebiet, neben dem der Erfassung von Bruch und Verschnitt, einige Aufmerksamkeit zu schenken.

1. Der Glasbruch

Bei der Produktion von Glas kommt es natürlich immer wieder vor, daß sich das Sprichwort "Glück und Glas, wie

1) In der Matrix erhalten wir dabei mit der Zielfunktion $n + 1$ Zeilen.

leicht bricht das" bewahrheitet und Glas zu Bruch geht. Bei unseren Überlegungen ist diesem Umstand aber bisher noch keine Bedeutung beigemessen worden. Solcher Bruch ist natürlich in seinem Auftreten und seinen Ursachen rein zufällig und kann daher im Einzelfall nicht berücksichtigt werden. Geht man aber von der gesamten Produktion über einen längeren (vergangenen) Zeitraum aus, so läßt sich jederzeit ein Bruchkoeffizient bestimmen, d.h. ein gewisser Anteil Glas, der im Laufe der Produktion aus den unterschiedlichsten Ursachen zu Bruch geht. Für Planungsüberlegungen dürfte ein solcher Koeffizient ausreichend sein. Für unsere quantitativen Erfassungen kann man davon ausgehen, daß zum Versand von einer Kiste Glas mit 48 Basisquadratmetern z.B. rund 5 % mehr Glas hergestellt werden müssen. Diese 5 % Mehrproduktion gehen im Laufe der Verarbeitung verloren. Dabei wird ein linearer Verlauf der Bruchentstehung unterstellt, d.h. in jeder Bearbeitungsphase herrschen die gleichen Bruchwahrscheinlichkeiten. Stellt sich nun aufgrund betrieblicher Erfahrung und Erfassung heraus, daß die Bruchwahrscheinlichkeiten an einigen Verarbeitungsstellen besonders groß sind, so läßt sich dies durch die Ermittlung spezieller Bruchkoeffizienten berücksichtigen. Das gleiche gilt für die Überlegung, daß einzelne Sorten besonders anfällig für Bruch sind; das ist z.B. für Dünnglas der Fall. Die Berücksichtigung von Bruchwahrscheinlichkeiten, im Extrem je Sorte und Verarbeitungsstelle, bedingt, daß dies in den oben angegebenen technischen Koeffizienten eingerechnet werden muß.

So benötigt man etwa zur Ausbeute von 48 Basisquadratmetern Bauglas nicht 16 Minuten, sondern z.B. 16,5 Minuten, weil ein höherer "Einsatz" gezogen werden muß. Für die anderen technischen Koeffizienten ergeben sich ähnliche Verschiebungen.

2. Der Glasverschnitt

Neben dem Bruch entsteht beim Glas auch beim Schneiden Abfall, der im Planungsansatz gesondert zu berücksichtigen ist. Die Ursache für den Verschnittanfall liegt - neben Glasfehlern, die herausgeschnitten werden müssen - in der Unmöglichkeit, die zufällig zusammengesetzten Kundenaufträge bzw. Werksaufträge nach Breite, Länge und Anzahl so zu kombinieren,¹⁾ daß die Ausbeute der Rohglastafel hundert Prozent beträgt. Dieser sogenannte Kombinationsverschnitt in Verbindung mit den Glasfehlern kann im Einzelfall beträchtlichen Schwankungen unterliegen, die eine Berücksichtigung im Planungsansatz schwierig erscheinen lassen. Allerdings hat sich bei der Untersuchung von Vergangenheitswerten herausgestellt, daß der Gesamtverschnitt immer relativ konstant bleibt, so daß ein Ansatz in Form eines durchschnittlichen Verschnittkoeffizienten möglich erscheint.

Bei den einzelnen Glassorten müssen wir jeweils eigene Verschnittkoeffizienten bestimmen, da z.B. die absolute Flächengröße der geschnittenen Dünngläser im Verhältnis zu den anderen Gläsern (Bau- und Dickglas) relativ klein und damit durch die bessere Kombinationsmöglichkeit eine größere Ausnützung der Rohglastafeln gegeben ist.²⁾ Die Beachtung des Verschnittes im Planungsansatz bedingt dann - ähnlich wie beim Bruch - eine Veränderung der technischen Koeffizienten Ziehen und Schneiden, da die Ausbeute von 48 Basisquadratmeter Glas eines um den Verschnittkoeffizienten höheren Ansatzes gezogenen bzw. geschnittenen Glases bedarf. Diese Aufrechnung erscheint

1) Wir verweisen in diesem Zusammenhang auf die ausführliche Erörterung des Verschnittproblems im Kapitel E/III/2

2) Vgl. Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas ..., a.a.O., S. 63/64 - Eine ansteigende Flächengröße bedingt eine wachsende Scheibendicke.

- neben der des Bruches - jederzeit und ohne Schwierigkeiten möglich.

3. Die Glasqualität

Bemühen jeglicher Tafelglasherstellung ist es, möglichst fehlerfreies Glas herzustellen. Daher gibt es neben den jeweiligen Dicken (Dünn-, Bau- und Dickglas mit Feineinteilungen) auch Qualitätsbezeichnungen. So unterscheidet man beim Bauglas (Fensterglas): Sorte¹⁾ 1, 2 und Gärtner-
eiglas und beim Dickglas Autoglas, AV (ausgesuchte Verglasung), V (Verglasung). Beim Dünn-
glas ergeben sich die Qualitätsunterscheidungen aus den einzelnen Verwendungszwecken.

Die Qualitätseinteilung unterliegt zum Teil - so bei Bauglas - den Vorschriften nach DIN 1249, zum anderen haben sich gewisse Gebrauchsnormen herausgebildet, auf deren Einhaltung die Glashütten durch erfahrenes Personal achten. Die Qualitätseinordnung bezieht sich auf die Häufigkeit des Auftretens von Glasfehlern²⁾ und die Ebenflächigkeit, die wesentlich für die verzerrungsfreie Durchsicht ist. Das Gewicht der einzelnen Merkmale verschiebt sich innerhalb der Dickenbereiche. Die von JEBSEN-MARWEDEL³⁾ entnommenen Sortierungsrichtlinien für

1) Hierbei wird der Sortenbegriff, unabhängig vom betriebswirtschaftlichen Sortenbegriff, zur Qualitätsunterscheidung angewandt.

2) An Glasfehlern können aus den verschiedensten Ursachen auftreten: Steinchen (feste Körper im Glas), Schlieren (Glas im Glas), Galle (Aussickerung), Blasen (Gase im Glas), Färbung (Mißfärbung), Entglasung (Kristalle im Glas), Bearbeitungsfehler, Spannung, Niederschläge. Vgl. dazu besonders Jebesen-Marwedel, H.: Glastechnische Fabrikationsfehler. Eine pathologische Technologie des Werkstoffes Glas. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1959, S. 10 mit den möglichen Störungsquellen.

3) Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas ..., a.a.O., S. 52

die einzelnen Glasdicken zeigen dies deutlich auf.

Ungefähre Sortierungsanforderungen an das Tafelglas
der verschiedenen Dickenbereiche

Dicken- bereiche	Hauptsächliche Verwendungsgebiete	Vorherrschende Sortierungsrichtlinien
0,6—1,2	Objekttträger, Scheiben für Geräte und Feuermelder, Sicherheitsglas für Schutz- brillen, Trockenplatten usw.	Beste Auswahl bis auf unver- meidliche wenige Fehler, ge- nauer Zuschnitt (Trocken- platten-Spezialsortierung)
1,2—1,5 1,5—1,8	»Nutphotos« für Bilder usw., Trockenplatten, Kleinspiegel, Glas für Vogelkäfige und dergleichen	Sortierung nur z. T. wie nach DIN-Norm 1249; meist Spe- zialsortierung nach Eben- flächigkeit und Blasenreinheit
2,0 (bcglisch)	Bilderglas, Sicherheitsglas, Reproduktionsgläser	Ruhige Oberfläche, darf nur kleinste Fehler enthalten
ED 1,8—2,0 und 2,3 ($\frac{1}{4}$)	Bauglas (Fenster- glas)	Außerdem: Belege- glas, Gartenglas
MD 2,8—3,0 ($\frac{1}{4}$)	Sorte eins	Standuhren, Schil- der, Belege-, Fahr- zeugglas, Garten- glas
DD 3,6—4,0 ($\frac{1}{4}$)	und Sorte zwei	Möbelglas, Aufleger, Belege-, Fahrzeug-, Reproduktions-, Schleifglas, Gar- tenglas
4—5	Autoglas und Möbelglas	Einwandfreie Oberfläche und Durchsicht
5—6 6—7	Dick- glas	Besonders ruhige Oberfläche; bei Verglasungsqualitäten nur kleine Fehler zulässig
über 7	Schleifglas (zur Weiterverarbeit- ung)	Weitgehende Blasenfreiheit; Oberflächenfehler zulässig, dagegen besonders ebenflächig, nicht keilig

Quelle: Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas ..., a.a.O.,
S. 52

Arbeitstechnisch vollzieht sich die Qualitätseinordnung entweder durch den Glasschneider beim Schneiden oder durch eine gesonderte Prüfstelle. Natürlich unterliegt der gesamte Herstellungsprozeß einer dauernden Kontrolle; durch sofortige Überprüfung des Glases bei der Abnahme auf der Zieh Bühne versucht man den Ziehvorgang in seinem weiteren Verlauf korrigierend zu beeinflussen. Dabei bleibt aber die Tatsache bestehen, daß eine Maschine niemals während der ganzen Ziehperiode hochwerti-

ges Glas erbringt, sondern die Glasproduktion besonders zu Beginn und am Ende größeren Qualitätsschwankungen unterworfen ist.

Für unseren Untersuchungsbetrieb beläuft sich der Anteil Qualitätsglas 1. Grades - aus Vergangenheitswerten abgeleitet¹⁾ - auf 30 %; als 2. Qualität ist 60 % der Gesamterzeugung eingestuft worden und als 3. Qualität 10 %.²⁾

Für Gläser 1. Qualität lassen sich am Markt naturgemäß große Erlöse erzielen, während die variablen Kosten dabei nur geringfügig ansteigen; der Deckungsbeitrag ist also insgesamt höher. Dem Bestreben der Unternehmung, nur Glas 1. Qualität herzustellen, sind die oben angegebenen Grenzen gesetzt. Ähnliches gilt für die 2. Qualität. Es stellt sich die Frage, ob eine Berücksichtigung obiger Qualitätsmerkmale im Planungsansatz möglich ist.

Für den operationsanalytischen Ansatz würden unsere obigen Überlegungen bedeuten, daß wir jede Sorte x_i in drei Untersorten x_{ij} aufspalten müssen. Die technischen Koeffizienten der 1. Qualität sollen die größere Sorgfalt beim Schneiden und Verpacken wiedergeben. Für die Prüfstelle soll immer genügend Kapazität vorhanden sein, so daß hier niemals ein Engpaß auftreten kann und eine Beachtung im Ansatz nicht notwendig ist.

Für die Berücksichtigung der Qualitäten ergäbe sich dann

-
- 1) Die Werte sind an der Wirklichkeit orientiert.
 - 2) Die Einstufung von Qualitäten hängt trotz bestehender Richtlinien weitgehend vom Gutdünken der einzelnen Sortierer ab. Dabei kommt es nicht selten zu unterschiedlicher Beurteilung von Glasposten innerhalb verschiedener Abteilungen. So qualifiziert die Abteilung Wanne/Ziehen nicht selten zu positiv, während sich das Schneidhaus mit dieser Einstufung nicht einverstanden erklären kann.

folgender allgemeiner Ansatz:

Ziehen:

$$\overbrace{a_{11}x_{11} + a_{12}x_{12} + a_{13}x_{13} \dots}^{x_1} \quad a_{1m}x_{1m} \leq b_1$$

Schneiden I:

$$a_{21}x_{11} + a_{22}x_{12} + a_{23}x_{13} + a_{24}x_{14} + a_{25}x_{15} + a_{26}x_{16} \leq b_2$$

Packen:

$$a_{51}x_{11} + a_{52}x_{12} \dots \quad a_{5m}x_{1m} \leq b_5$$

Zielfunktion

$$c_{11}x_{11} + c_{12}x_{12} + c_{13}x_{13} \dots \quad c_{1m}x_{1m} \Rightarrow \text{Max}$$

Bedingungsgleichungen

$$x_{11} + x_{12} + x_{13} = x_1$$

$$x_{11} \leq \frac{30}{100}x_1; \quad x_{12} \leq \frac{60}{100}x_1; \quad x_{13} \leq \frac{10}{100}x_1 \quad ;^1)$$

$$x_{14} + x_{15} + x_{16} = x_2$$

$$x_{14} \leq \frac{30}{100}x_2; \dots$$

Es läßt sich nur abschätzen, ob ein solcher Ansatz im praktischen Fall überhaupt lösbar ist. Selbst unter der Voraussetzung einer mathematischen Lösungsmöglichkeit würde ein realistisches Modell unserer Glasfabrik bei Berücksichtigung aller Besonderheiten so umfangreich

1) Für die einzelnen Sorten könnten sich auch unterschiedliche Qualitätsverhältniszahlen ergeben.

sein, daß es auch mit einem größeren Computer nicht wirtschaftlich zu berechnen wäre. Rufen wir uns ins Gedächtnis, daß das Dünnglas allein 4 unterschiedliche Dickeneinteilungen hat und jede dieser Dicken mindestens 30 unterschiedliche Flächenkombinationen ermöglicht. Jede Flächenkombination bedarf dreier Qualitätsansätze; so erhalten wir allein im Dünnglasbereich

$$4 \cdot 30 \cdot 3 = 360 \text{ Variable.}$$

In den übrigen Dickenbereichen wären die Variablen noch zahlreicher.

Durch die Beachtung von Absatzmindestmengen und Produktionshöchstmengen ergeben sich weitere Bedingungsgleichungen, die den Rechenaufwand zusätzlich erhöhen.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß der rechen-technische Ansatz grundsätzlich möglich ist, seine Lösung aber auf Grenzen stößt, die in der Kapazität des Computers und in der Wirtschaftlichkeit der Parameterermittlung liegen. Wir sollten daher nach Vereinfachungen in Ansatz und Lösung suchen.

4. Darstellung eines vereinfachten Ansatzes

Wie wir aus den vorangegangenen Ausführungen gesehen haben, bringt die Berücksichtigung aller Variablen und der verschiedenen Besonderheiten (Bruch, Verschnitt, Qualität) bei der Programmplanung der Glasfabrik einen so großen Arbeits- und Erfassungsaufwand mit sich, daß es unter Kostengesichtspunkten fraglich wird, ob der erstrebte Zweck den Aufwand überhaupt lohnt. Außerdem ergibt eine solche Vielzahl von Inputdaten die Gefahr einer steigenden Zahl von Erfassungsfehlern, die durch Fehlerakkumulationen¹⁾ die Genauigkeit der Lösung beeinträch-

1) Natürlich ist hier auch ein Fehlerausgleich denkbar.

tigen.¹⁾ Es muß daher überlegt werden, ob sich durch Bildung sogenannter Größenkategorien eine Verminderung der Variablen erreichen läßt.

Wir gehen dabei von der Feststellung aus, daß für Schneiden und Packen bei nahezu gleichgroßen Flächen je Sorte relativ gleiche Zeiten benötigt werden. Wir fassen deshalb die Vielzahl der nur geringfügig schwankenden Flächengrößen - die Breitendifferenz beträgt 4 bzw. 8 cm - zu einigen wenigen Größenkategorien zusammen.²⁾ Die Zeitabweichungen³⁾ innerhalb solcher Größenkategorien⁴⁾ sind relativ gering und können für Planungszwecke in Kauf genommen werden. Ähnliches gilt für die Ermittlung der Deckungsbeiträge.

Mit Hilfe dieser Größenkategorien läßt sich also die Vielzahl möglicher Variablen auf eine übersehbare Anzahl

-
- 1) Morgenstern bemerkt hierzu: "Linear programming requires enormously large numbers of operations, and, at least for that reason, a high degree of accuracy is required." (S. 282) - "Therefore current and future collections of data suitable for linear programming, whether for economic or logistic purposes, should give particular attention to the numerical determination of the accuracy of the data." (S. 283) Morgenstern, O.: The Accuracy of Economic Observations, S. 282 - 284. In: Koopmans, T.C. (Hrsg.): Activity Analysis of Production and Allocation - Proceedings of a Conference. "Cowles Commission for Research in Economics", Monograph No 13, New York - London 1951
 - 2) Die Längen der Freismaße sind sowieso auf eine geringe Anzahl normiert. Festmaße, d.h. vom Kunden genau vorgeschriebene Längen- und Breitenmaße, können in obige Flächenkategorien eingeordnet werden.
 - 3) Diese Überlegungen sind nur für das Schneiden und Verpacken notwendig. Beim Ziehen haben wir - siehe Beispiel - einen von der Auftrags-Flächengröße unabhängigen technischen Koeffizienten.
 - 4) Die Einteilung der Größenkategorien kann sich an der Häufigkeit der verkauften Glasbreiten orientieren. Vgl. hierzu etwa die Verteilung gelieferter Glasbreiten für das Jahr 1939 bei Jebesen-Marwedel, H.: Tafelglas ..., a.a.O., S. 61

von "Kategorie"-Variablen reduzieren, deren Planungsansatz und Lösung bei vertretbarem Rechenaufwand möglich erscheint.

Eine grundsätzlich andere Frage besteht in der Überlegung, ob es im Falle der Glasfabrik überhaupt notwendig ist, Linear Programming anzuwenden. Unabhängig von den Ergebnissen unseres fiktiven Beispiels ergibt sich in der Realität der Glasfabrik ein einziger wirklicher Engpaß - nämlich das Ziehen. Alle anderen Bereiche können unter den heute herrschenden Verhältnissen als frei variierbar betrachtet werden. Sie sind also als sogenannte "produktive Faktoren" nicht zu beachten. Es würde demnach zur Steuerung der Produktion genügen, die errechneten Deckungsbeiträge der einzelnen Sorten - ähnlich dem Beispiel in Teil 2/C/I/5 dieser Arbeit - zu den benötigten Ziehzeiten in Beziehung zu setzen, um damit, unter Berücksichtigung von Mindest- und Höchstmengen, die vorhandene Kapazität aufzuteilen.

Unter Zugrundelegung unseres Beispiels ergibt sich folgende Mengenzuordnung der Ziehkapazität

	Dünnglas Bauglas Dickglas		
Ziehzeit / Einheit (Min/E)	11	16	32
Deckungsbeitrag / Einheit (DM/E)	50,--	55,--	75,--
Ziehkapazität: 12 600 Min			

Aus obigen Angaben erhalten wir die Präferenzliste der Kapazitätsaufteilung nach dem Deckungsbeitrag / Zeitraum (660 Minuten) oder Deckungsbeitrag / Ziehminute mit:

Dünnglas 3.000,- DM/Zeitraum(660 Min) oder 4,54 DM/Ziehmin.
Bauglas 2.269,- DM/Zeitraum(660 Min) oder 3,44 DM/Ziehmin.
Dickglas 1.546,- DM/Zeitraum(660 Min) oder 2,34 DM/Ziehmin.

Der Absatzplan enthält folgende Angaben:

Dünnglas:	höchstens 300	mindestens 150	Einheiten
Bauglas:	höchstens 400	mindestens 200	Einheiten
Dickglas:	höchstens 150	mindestens 75	Einheiten

Den maximalen Erfolg aus der Aufteilung der Ziehkapazität erhalten wir dann mit folgender Produktion:

Dünnglas:	300	Einheiten
Bauglas:	400	Einheiten
Dickglas:	90	Einheiten
Gesamtdeckungsbeitrag:		43.750,-- DM

Natürlich fehlt dieser Lösung die absolute Richtigkeit der linearen Programmplanung. Vielleicht würden aber solche Überlegungen im Falle der Glasfabrik für eine rein praxisorientierte Programmplanung genügen und das relativ komplizierte Instrumentarium des Linear Programming überflüssig machen.

5. Zusammenfassung

Wir haben in diesem Kapitel versucht, die Möglichkeiten und Grenzen einer "linearen Programmplanung" in der Glasfabrik darzustellen. Über die Erfüllung der Grundvoraussetzungen des Produktionsmodells und die Darstellung eines an den Produktionszusammenhängen orientierten, fiktiven, einfachen Beispiels sind wir auf Schwierigkeiten, die sich aus der mangelnden Beherrschbarkeit des Produktionsprozesses ergeben, gestoßen. Wir haben die Möglichkeiten einer Berücksichtigung des Bruches, Verschnittes und der Qualitäten aufgezeigt und zum Schluß mit der Bildung von Größen-Kategorien eine mögliche Reduzierung der Variablen angeführt.

Mit Absicht stellen wir die praktische Durchführung zum Teil etwas skeptisch dar, obwohl wir nach wie vor der Meinung sind, daß grundsätzlich eine Anwendung der "linearen Programmplanung" bei der Glasfabrik möglich ist. Ob sie auch notwendig ist und inwieweit das Ergebnis die dafür gemachten Aufwendungen rechtfertigt, soll und kann hier nicht weiter untersucht werden.¹⁾ Die Unsicherheiten aus der mangelnden Beherrschbarkeit von Bruch, Verschnitt und Qualität konnten zwar im Modellansatz gemeistert werden; es soll aber nicht ungesagt bleiben, daß sie bei einer praktischen Durchführung manchen kritischen Einwand ergeben und eine im Produktionstyp liegende Grenze bilden.

Die Komplexität des Problems mit all seinen Einflußfaktoren und Variablen bringt eine allgemeine Schwierigkeit der Erfassung mit sich, die sich auch bei anderen als Operations-Research-Verfahren bemerkbar machen würde. Hierin zeigt sich einfach die generelle Tendenz, daß einfachere Probleme auch mit Operations Research leichter zu durchdringen sind.

Bei aller Neuartigkeit des theoretischen Ansatzes und des angewandten Instrumentariums sollten wir uns stets der Grenzen und des Gültigkeitsbereiches unserer Berechnungen sowie der Abstraktion bewußt bleiben, indem wir für einen realen Sachverhalt ein nicht voll adäquates mathematisches Modell zur Darstellung gewählt haben.²⁾ Durch die Exaktheit des Ansatzes und der Rechenoperationen wird keinesfalls auch die Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Aussagefähigkeit der Ergebnisse garantiert,

1) Vgl. Brand, H.W.: Über die Fruchtbarkeit mathematischer Verfahren in der Wirtschaftstheorie. Meisenheim/Glan 1959, S. 56

2) Vgl. Brand, H.W.: Über die Fruchtbarkeit mathematischer Verfahren in der Wirtschaftstheorie. Meisenheim/Glan 1959, S. 56

denn diese können nicht exakter sein als die Ausgangsdaten.¹⁾

Zum Abschluß dieses Kapitels sei ein Ausspruch SCHMALENBACHs zitiert, der sich auf die Anwendbarkeit der "linearen Programmplanung" übertragen läßt. "Eine Theorie muß, soll sie gut sein, ein handlicher Apparat sein, den man in der Tasche mitführen kann."²⁾ Dies läßt sich zwar von der Konzeption her für die "lineare Programmplanung" ohne weiteres behaupten, wenn auch die praktische Ermittlung der Parameter nicht immer einfach zu bewerkstelligen ist.

1) Vgl. Mathieu, J. - Zimmermann, W.: Bestimmung ..., a.a.O., S. 61/62

2) Schmalenbach, E.: Selbstkostenrechnung und Preispolitik. 7. Aufl., Leipzig 1934, S. 89

D) Die Anwendung operationsanalytischer Verfahren bei der Ablaufplanung der Glasfabrik

Aus der Vielzahl der in der Literatur und in unserem allgemeinen Teil dargestellten Beispiele operationsanalytischer Ablaufplanung läßt sich im Rahmen der Glasfabrik nur eine begrenzte Anzahl anwenden.

So entfällt das Grenzgebiet des sogenannten "Production Smoothing", da es sich bei der Glasfabrik im wesentlichen um Auftragsfertigung handelt. Auch das Reihenfolgeproblem mit seinen verschiedenen Nebenplänen (Auftragsfortschrittsplanung, Maschinenbesetzungsplanung, Zwischenlagerplanung) findet in der Glasfabrik keine adäquate Problemsituation. Bei der Termingrobplanung mit der Planung der Durchlaufzeit (Netzplantechnik), der Teilebedarfsrechnung (Gozinto Theorem) und der Kapazitätsausgleichsrechnung sind die Verhältnisse bei der Glasfabrik so übersichtlich, daß es zur Problemlösung nicht unbedingt des Operations Research bedarf.

Übrig bleiben Beispiele aus dem Bereich der Verfahrensauswahl - optimale Auswahl der Maschinen (Ziehmaschinen und Schneidvorrichtungen) bei gegebenen Aufträgen - und der Transportplanung, die im folgenden dargestellt werden sollen.

I. Die optimale Belegung der Ziehmaschinen

Bei diesem Beispiel wollen wir "die Methode zur Lösung des Transportmodells" anwenden, obwohl der Problemansatz jederzeit auch mit Linear Programming formulierbar und mit der Simplexmethode lösbar ist. Wir benutzen diese spezielle Methode, um auch diese Lösungsart - unabhängig von der üblichen Problemformulierung des Transportmodells - einmal darzustellen. Es zeigt sich, wie früher

schon angedeutet, daß sich unter mathematisch gleichen Problemformulierungen ganz verschiedene betriebliche Situationen verbergen können. Für die Anwendung der "Transportmethode" bedarf es gewisser - noch aufzuzeigender - Voraussetzungen, die aber im wesentlichen als erfüllt gelten können.

Aus der Sicht der Ablaufplanung handelt es sich um ein Problem der optimalen Maschinenauswahl, bei dem gegebene Aufträge vorhandenen Maschinenkapazitäten (optimal) zugeordnet werden. Als Vorlage hat uns dabei ein von FERGUSON-SARGENT¹⁾ entwickeltes und von KREKÓ²⁾ mit anderen Zahlen wiedergegebenes Modell gedient.

1. Problemformulierung

In der Glasfabrik stehen in einem bestimmten Zeitpunkt drei Ziehmaschinen mit voraussichtlich jeweils 40 Stunden Laufzeit zur Verfügung.³⁾ Es handelt sich um Maschinen mit unterschiedlicher Nutzbreite. Diese drei Ziehmaschinen sollen zur Herstellung von vier verschiedenen Produkten A, B, C und D mit unterschiedlichen Mengen dienen. Dabei geht man von dem Gedanken aus, daß die Produktion der geforderten Aufträge aufgrund der verschiedenen Nutzbreiten mit unterschiedlichen Produktivitäten möglich ist. Dies ergibt sich vor allem aus dem

1) Vgl. Ferguson, R.O. - Sargent, L.F.: Linear Programming, Fundamentals and Applications. New York - Toronto - London 1958, S. 43 - 70

2) Vgl. Krekó, B.: Lehrbuch der linearen Optimierung. Berlin 1964, S. 272 - 275

3) Ein solch kurzer Zeitraum ist auch bei der Glasfabrik vorausschaubar. Hierbei läßt sich das im Zeitablauf begründete "Schlechtwerden" der Ziehmaschine einplanen. Gegen einen unvorhergesehenen Maschinensturz ist auch eine intuitive Maschinenbelegungsplanung machtlos.

verschieden großen Kombinationsverschnitt¹⁾ bei den einzelnen Breiten.

Bei den Aufträgen kann es sich um Gläser gleicher Dicke, aber verschiedener Größe oder auch um verschiedene Dicken verschiedener Größe handeln. In letzterem Falle sind auch noch, falls auf der gleichen Ziehmaschine verschiedene Dicken gezogen werden, Umstellzeiten zu berücksichtigen. Als Einheitsgröße wollen wir Scheiben der gewünschten Größe unterstellen. Diese geforderten Scheibengrößen sind nun wegen der unterschiedlichen Nutzbreiten der Ziehmaschinen verschieden gut herstellbar, d.h. es können pro Stunde auf den einzelnen Ziehmaschinen unterschiedlich viele Scheiben der gleichen Art - unter Berücksichtigung des späteren Glasverschnitts - gezogen werden. Genauso gut könnten wir aber "Kisten Glas" als Bezugsgröße unterstellen.²⁾

Der Auftrag soll bei den verschiedenen Produkten

	A	B	C	D	
auf	500	1750	1200	1050	Stück lauten.

Aus der folgenden Tabelle ergibt sich, wieviel Stück auf den Maschinen von den einzelnen Produkten in einer Stunde hergestellt werden können.

Produkte				
Ziehmaschine	A	B	C	D
I	20	50	40	30
II	22	55	44	33
III	26	65	52	39

Tab. 1

1) Vgl. die Ausführungen über das Verschnittproblem Teil 2/E/III/2

2) Wir haben hier die bei Krekó, B.: a.a.O., S. 272 - 275 angegebenen Zahlen übernommen, da sie für das eigentliche Problem letztlich unwesentlich sind.

Dabei entstehen folgende Produktionskosten/Stück:

	A	B	C	D
I	5,2	2,1	2,4	3,2
II	5,1	2,2	2,3	3,3
III	4,5	2,3	2,0	3,4

Tab. 2

Es soll die optimale Maschinenbelegung mit minimalen Kosten und unter Einhaltung der gegebenen Kapazitäten für den gesamten Auftrag bestimmt werden.¹⁾

2. Berechnung des Problems

Aufgrund von Tab. 1 zeigt es sich, daß die Produktivitäten der einzelnen Maschinen proportional sind. Die Steigerung der II. Maschine beträgt 10 % gegenüber Maschine I; die der III. Maschine 30 %. Dementsprechend lassen sich den Maschinen Produktivitätsindizes zuordnen

Maschinen	Index
I	1,0
II	1,1
III	1,3

Tab. 3

Diese Proportionalität ermöglicht erst die Anwendung der Distributionsmethode (Verteilungsmethode), einer Sonderform der "Transportmethode".

Mit Hilfe der Indizes der Tab. 3 drücken wir sowohl die Kapazitäten als auch die herzustellenden Produktmengen

1) Der Glasbruch kann mit Durchschnittszahlen Berücksichtigung finden. Für die nähere Behandlung verweisen wir auf unsere Ausführungen zu diesem Problemkomplex im Kapitel Fertigungsprogrammplanung Teil 2/C/III/1

in Standardstunden aus, d.h. wir geben an, in wieviel Stunden Maschine II und III soviel leisten können wie Maschine I und in wieviel Stunden die Maschine I die einzelnen Produktmengen A, B, C und D herstellen kann.

Für die Kapazitäten ergeben sich

Maschinen	Standardstunden
I	40
II	44
III	52

Tab. 4

und für die Auftragsmengen

Produkte	A	B	C	D
Benötigte Maschinenzeit in Standardstunden	$\frac{500}{20}$	$\frac{1750}{50}$	$\frac{1200}{40}$	$\frac{1050}{30}$
[Std.]	25	35	30	35 Σ 125

Tab. 5

Wir müssen nun bestimmen, wie hoch die Produktionskosten für die verschiedenen Maschinen und Produkte in einer Standardstunde sind. Zu diesem Zweck multiplizieren wir die einzelnen Spalten der Tab. 2 mit 20, 50, 40 bzw. 30 und erhalten folgende Kostenmatrix (Tab. 6):

	Produkte			
Maschinen	A	B	C	D
I	104	105	96	96
II	102	110	92	99
III	90	115	80	102

Tab. 6

die sich mit den benötigten und den zur Verfügung ste-

henden Kapazitäten zu folgender, dem Transportproblem¹⁾ formal adäquaten, Ausgangsmatrix erweitern läßt:

	A	B	C	D		vorhandene Kapazität
I	104	105	96	96	0	40
II	102	110	92	99	0	44
III	90	115	80	102	0	52
benötigte Kapazität	25	35	30	35	11 ²⁾	136

Tab. 7

Die vorhandene Kapazität soll durch die gegebenen Aufträge kostenminimal ausgenutzt werden. Dabei haben wir m Maschinen, von denen jede i -te eine bestimmte Kapazität a_i aufweist. Dazu kommen n Produkte ($n \neq m$), von denen jeder j -te Auftrag b_j Kapazität benötigt. Dann gilt allgemein:

$$(1) \quad \sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$$

Als Zielfunktion dienen uns die Kosten (c_{ij}), die bei der Produktion entstehen und die insgesamt ein Minimum ergeben. Es soll also aus der m mal n Matrix eine Kombi-

1) Darstellungen des Transportproblems finden sich in allen bekannten Lehrbüchern. Besonders sei aber verwiesen auf:

Eichenberger, H.: Ökonomische Methoden in der Linearen Planungsrechnung. Hamburg - Berlin 1963 (Schriftenreihe des Instituts für Automation und Unternehmensforschung der Universität Freiburg/Schweiz).

S. 56 - 83

Dantzig, G.B.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 343 - 358

Charnes, A. - Cooper, W.W.: The Stepping Stones Method of Explaining Linear Programming Calculations in Transportation Problems. In: Mgmt. Sci. (1) 1954, S. 49 - 69

Krekó, B.: a.a.O., S. 13 - 35

2) Die vorhandene Kapazität übersteigt die benötigte Kapazität um 11 Einheiten, daher die Leerspalte.

nation von nichtnegativen ganzen¹⁾ Zahlen x_{ij}

$$(2) \text{ mit } \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \text{ für jedes } j$$

und

$$(3) \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \text{ für jedes } i$$

bestimmt werden, die den Ausdruck

$$(4) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} c_{ij}$$

minimiert, wobei

$$(5) \quad c_{ij} \geq 0 \text{ sein soll.}$$

a) Die Umformung der Matrix²⁾

Bevor wir versuchen, die Ausgangslösung zu gewinnen, wollen wir die Matrix vereinfachen. Dabei benützen wir die Erkenntnis,³⁾ daß das Ergebnis unverändert bleibt, wenn die Elemente in irgend einer Zeile oder Spalte der Kostenmatrix um die gleiche Größe vermehrt oder vermindert werden.

Die Matrixumformung wird so lange vorgenommen, bis sowohl in den Spalten als auch in den Zeilen die Null als das kleinste "Kosten"element erscheint.

Regel: Wir wählen in jeder Spalte das minimale Element aus und subtrahieren es von allen Spaltenelementen.

1) Nicht-ganzzahlige Lösungen treten bei diesen Lösungsmethoden nicht auf.

2) Vgl. Krekó, B.: a.a.O., S. 15 - 29

3) Vgl. den mathematischen Beweis bei Krekó, B.: a.a.O., S. 202 - 205

Dann erhalten wir als neue Matrix

14	0	16	0	0	40
12	5	12	3	0	44
0	10	0	6	0	52
25	35	30	35	11	

Tab. 8

Die obige Regel¹⁾ auf die Zeilen anzuwenden, erübrigt sich in unserem Fall, da wir durch die Leerspalte schon in jeder Zeile eine Null haben.

Das noch zu bestimmende optimale Belegungsprogramm ist somit für die Endgesamtkostenberechnung mit einer Art "fixem Kostenblock" zu belasten, der durch die Matrixumformung entstanden ist.

Er beträgt in unserem Fall:

$$25 \cdot 90 + 35 \cdot 105 + 30 \cdot 80 + 35 \cdot 96 = 11\,685 \text{ DM}$$

und besteht aus den subtrahierten Kostengrößen je Spalte und gegebenenfalls Zeile, multipliziert mit den benötigten Kapazitäten.

b) Gewinnung einer Ausgangslösung

Der Grundgedanke der hier angewandten Verteilungsmethode geht davon aus, daß wir zunächst ein zulässiges Programm gewinnen, das wir schrittweise bis zur optimalen Lösung verbessern. Eine solche Iteration setzt aber ein nicht-degeneriertes Problem voraus. Bei den noch zu zeigenden Umformungen werden wir feststellen, daß die einzelnen Aktivitäten (x_{ij}) miteinander verbunden sind. Wir spre-

¹⁾ Die Umformung kann auch mit der Zeilenminimierung begonnen werden.

$$(6) \quad x_{ij} = a_i = b_j$$

während noch weitere unerfüllte Bedingungsgrenzen vorhanden sind.¹⁾ Wir helfen uns mit einem Kunstgriff, indem wir nur Spalte bzw. Zeile streichen und mit einem besetzten Nullelement²⁾ fortfahren. Damit wird auch gewöhnlich die weitere Bedingung erfüllt, die besagt, daß die Anzahl der besetzten Felder gleich der Summe der Spalten- und Zeilenzahl minus 1 sein muß,

also (7) $m + n - 1 = \text{Anzahl der besetzten Felder}$.³⁾

Ist (7) erfüllt, so handelt es sich um ein nicht-degeneriertes Problem und man kann mit der Prüfung bzw. Gewinnung einer weiteren Lösung, bis zur optimalen, fortfahren.

Nachdem wir die formalen Kriterien der Interdependenz und des Eckenprinzips⁴⁾ beschrieben haben, wollen wir für unser Problem eine Ausgangslösung unter Beachtung obiger Gesichtspunkte erreichen.

Dabei gehen wir bei der Suche nach einer guten Anfangsverteilung von der "Regel der kleinsten Kosten" aus, wobei wir aus der Kostenmatrix nach dem kleinsten c_{ij} die erste - und alle weiteren - Basisvariable(n) (Zuteilung von Kapazität) x_{ij} derart auswählen, daß

-
- 1) Erst beim letzten Schritt gilt diese Bedingung. Bei der Northwest-Eckenmethode findet das im rechten unteren Feld statt; bei anderen Verteilungsmethoden irgendwo in der Matrix.
 - 2) Erhält den Wert Null, erfüllt aber die Funktion eines besetzten Feldes.
 - 3) Dies wird Dantzig's Eckenprinzip genannt.
 - 4) Weitere Einzelheiten und Erklärungen finden sich vor allem bei Eichenberger, H.: a.a.O., S. 56 - 83 und bei Dantzig, G.B.: Lineare ..., a.a.O., S. 343 - 360

$$(8) \quad x_{ij} = \min_{(i,j)} c_{ij} \text{ gilt.}$$

Unserer umgeformten Kostenmatrix Tab. 7 ordnen wir also in der Stelle c_{12} 35 Standardstunden zu. Für die Zeile 1 verbleiben dann noch 5, die der c_{14} zugeordnet werden. Die Spalte 4 benötigt aber noch weitere Stunden, die nach der Regel der kleinsten Kosten der c_{24} mit 30 zugeordnet werden. In der zweiten Zeile werden nach obiger Regel aufgrund der Bedingungsgrenzen auf c_{25} 11 Einheiten und auf c_{23} 3 Einheiten verteilt. Spalte 3 benötigt aber 30 Einheiten, so daß dann c_{33} 27 Einheiten und der Rest aus Zeile 3 c_{31} zugewiesen wird. Das ergibt folgende Ausgangsverteilung:

14	0	(35)	16	0	(5)	0	40	
12	5		12	(3)	(30)	0	(11)	44
0	(25)	10	0	(27)	6	0	52	
25	35	30	35	11				

Tab. 9

Die eingerahmten hochgestellten Zahlen geben die Basisvariablen x_{ij} für die Ausgangslösung wieder.

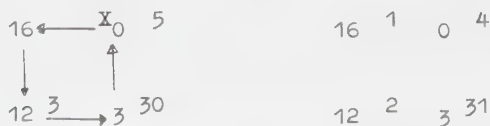
Die Prüfung nach dem Eckenprinzip (Gleichung 7) ergibt 7 besetzte Felder und damit keine Degeneration. Die Interdependenz ist ebenfalls gewahrt.

Die Gesamtkosten dieser Lösung belaufen sich auf die aus dem reduzierten Programm erhaltenen Grundkosten und den nach dem neuen Programm errechneten Kosten mit $12 \cdot 3$ und $30 \cdot 3 = 126 \text{ DM} + 11 \cdot 685 = 11 \cdot 811,-- \text{ DM}$. Es ist nun zu fragen, ob es sich bei dieser Lösung schon um die optimale handelt.

c) Optimalitätstest und neue Lösung

Sind alle besetzten Elemente des Tableaus 9 gleich Null, so ist es sicher, daß wir ein optimales Programm erhalten haben. Denn dann gibt es keine Möglichkeit mehr, die Produktionskosten zu vermindern. Dies ist aber im allgemeinen nicht der Fall. Somit ist eine Prüfung, ob das Programm verbessert werden kann, notwendig. Dazu bestehen verschiedene Möglichkeiten. Je einfacher diese sind, desto unverständlicher sind sie für den, der die mathematischen Grundlagen dieser Verfahren nicht kennt. Wir wollen im folgenden die verständlichste, aber für größere Projekte unhandliche Methode der Prüfung und Verbesserung aufzeigen.¹⁾

Wir gehen von dem Gedanken aus, daß sich die Gesamtkosten verändern, wenn wir die erhaltene Lösung in der Form umschichten, daß wir innerhalb der Begrenzungen einzelnen Lösungselementen Einheiten entziehen und sie anderen Stellen zuordnen. So können wir sagen, wir wollen auf Maschine eins nicht nur Produkt B und D herstellen, sondern auch Produkt C. Das würde dann bedeuten, daß wir innerhalb der vorhandenen Kapazität von 40 Stunden, dem Produkt D mit 5 Stunden eine Stunde wegnehmen und sie dem Produkt C zuführen. In Spalte drei ergibt sich dann eine Überkapazität von eins, so daß Maschine zwei eine Stunde zur Produktion von D abgeben muß. Dies ergäbe folgende Verteilung:



¹⁾ Wesentlich weniger Aufwand verursacht die Methode der Potentiale - vgl. Krekó, B.: a.a.O., S. 22 - 27 - auch Simplexmultiplikatoren - vgl. Dantzig, G.B.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 354 - 356 - genannt.

Die durch die Verschiebung entstehenden Kosten betragen
 $+ 16 - 12 + 3 - 0 = + 7$

Es würde also durch diese Verschiebung eine Kostenerhöhung von +.7 erfolgen, die der "freien" Stelle zugeordnet wird. Aufgrund der Plusbewertung (Kostenerhöhung) kann sie nicht in unserem Interesse liegen.

Alle freien Stellen werden nun solchen Bewertungen unterworfen, die angeben, inwieweit sich eine Verschiebung lohnen würde. Plusergebnisse wirken gesamtkostenerhöhend, Minusergebnisse gesamtkostenreduzierend. Die Ermittlung dieser Bewertungen erfolgt nach bestimmten einfachen Regeln.

Schritt 1:

Wir starten von einem beliebigen freien Element aus und fahren in horizontaler Richtung fort, bis wir auf ein besetztes Element treffen, das in der gleichen Spalte ein weiteres besetztes Element enthält. Wir beginnen also willkürlich z.B. mit c_{11} und verbinden mit c_{14} .

Schritt 2:

Nach jedem horizontalen Zug nehmen wir eine rechtwinklige Wendung vor. Wir verbinden geradlinig, und zwar so, daß wir jeweils nur ein besetztes Element anzielen. Dabei ist es unter Umständen erforderlich, daß wir ein besetztes Element in der Horizontalrichtung überspringen, wenn z.B. erreicht werden soll, daß wir damit auf dem kürzesten Weg zu unserem Ausgangselement zurückkehren können.

Schritt 3:

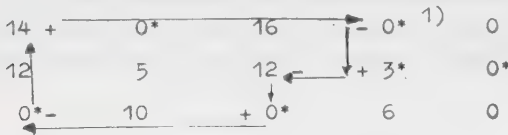
Auf diese Weise (erst horizontal, dann vertikal) fahren wir so lange fort, bis wir in einem horizontalen Zug

diejenige Spalte bestimmt haben, in der unser Ausgangselement liegt.

Schritt 4:

Mit jedem ausgeführten Zug ist ein Vorzeichenwechsel verbunden. Wir gehen dabei von dem Kostenelement der freien Stelle aus und bezeichnen dieses mit einem positiven Vorzeichen.

Für unser Beispiel ergibt sich folgender "Kreis":



Tab. 10

$$+ 14 - 0 + 3 - 12 + 0 - 0 = + 5$$

Schritt 5:

Die Schritte 1 - 4 werden so lange wiederholt, bis alle freien Elemente auf die beschriebene Art und Weise berechnet sind.

Die neue Bewertung für c_{11} ergibt + 5, wobei bei Plusbewertungen die Höhe uninteressant ist, denn eine Verschiebung ergibt nur eine Kostenvermehrung. Die Bewertungen der freien Elemente bilden also das Optimalitätskriterium der erhaltenen Lösung. Sind alle Bewertungen positiv, so liegt die optimale Lösung schon vor; gibt es auch negative Bewertungen, so zeigen diese, daß das Lösungsprogramm durch Verschiebungen von Aktivitäten x_{ij} an diese Stelle zu verbessern ist. Die Höhe der möglichen Verschiebung hängt innerhalb des betreffenden Kreises vom Aktivitätsniveau (belegten Mengen) der negativen

1) Die Kennzeichnung * steht für besetzte Elemente.

Eckpunkte ab. Mit dieser Menge kann dann die "freie" Stelle belegt werden und wir erhalten eine neue Verteilung, die wiederum auf die Optimalität geprüft werden muß.¹⁾

Bei der Prüfung auf Optimalität erhalten wir bei unserem Problem folgende Bewertungen der freien Elemente

7	$x^{2)}$	7	x	3
0	2	x	x	x
x	19	x	15	12

Tab. 11

nach nachstehenden Berechnungen der zugehörigen "Kreise".³⁾

$$\begin{aligned}
 s_{13} &: 16 - 0 + 3 - 12 = +7 \\
 s_{15} &: 0 - 0 + 3 - 0 = +3 \\
 s_{21} &: 12 - 12 + 0 - 0 = 0 \\
 s_{22} &: 5 - 3 + 0 - 0 = +2 \\
 s_{32} &: 10 - 0 + 12 - 3 + 0 - 0 = +19 \\
 s_{34} &: 6 - 0 + 12 - 3 = +15 \\
 s_{35} &: 0 - 0 + 12 - 0 = +12
 \end{aligned}$$

Es zeigt sich, daß unsere Ausgangslösung gleichzeitig schon die optimale Lösung des Problems darstellt. Dies ist aber nicht immer so.⁴⁾ Die Schnelligkeit der Lösung

1) Vgl. Krekó, B.: a.a.O., S. 19 - 21

2) Die x geben die besetzten Stellen an.

3) Das Problem hat mehrere Optima; z.B. ergibt ein Austausch von x_{23} (0) und x_{21} (3) sowie die entsprechenden Verschiebungen bei x_{33} (30) und x_{31} (22) die gleichen Gesamtkosten.

4) Den Versuch, das Problem mit Hilfe der Northwest-Eckenmethode und Stepping-Stone-Methode zu lösen, haben wir nach 6 Iterationen (ohne Ergebnis) abgebrochen und nach einer anderen Lösungsart Ausschau gehalten, die schon mit der reduzierten Ausgangslösung zum Erfolg geführt hat.

hängt weitgehend von der Qualität der Ausgangslösung sowie den angewandten Lösungsverfahren ab.¹⁾ Bei größeren Problemen ist die Wahl der Methoden nicht selten ein Über die Effektivität der Berechnungen - auch bei Benützung von Computern - entscheidendes Problem, das nach Möglichkeit von einem Mathematiker entschieden werden sollte.

Im übrigen können wir feststellen, daß die gegebene Beschreibung recht kompliziert anmutet und uns wie ein Rezept vorkommt, dessen Sinn und Funktionsweise wir unter Umständen nicht verstehen, die aber bei Befolgung dennoch zum Ziele führt. Es handelt sich eben um eine mathematische Methode, deren Rechenschritte dem Ökonomen nicht ohne weiteres einleuchten - obwohl wir eine Deutung versucht haben - und deren Beherrschung eine Angelegenheit des Gedächtnisses ist.²⁾ Die Anwendung setzt nur eine Kenntnis der 4 Grundrechnungsarten voraus und kann daher von jedermann durchgeführt werden, wenn das Problem einmal formuliert ist.

3. Interpretation der Lösung und kritische Würdigung

Setzen wir nun die erhaltenen Mengen in unsere Anfangskostenmatrix ein, so erhalten wir daraus folgende Gesamtkosten:

-
- 1) Eichenberger gibt einen Vergleich, inwieweit ein Problem mit verschiedenen Methoden schneller oder langsamer gelöst werden kann. Dabei erfordert die Anwendung der Northwest-Eckenmethode weitaus die meisten Iterationen. Vgl. Eichenberger, H.: a.a.O., S. 85
 - 2) Vgl. Eichenberger, H.: a.a.O., S. 64 - Dies trifft bei den anderen Methoden in weitaus stärkerem Maße zu, als bei dem von uns angeführten Verfahren.

	A	B	C	D		
I	104	105 ⁽³⁵⁾	96	96 ⁽⁵⁾	0	40
II	102	110	92 ⁽³⁾	99 ⁽³⁰⁾	0 ⁽¹¹⁾	44
III	90 ⁽²⁵⁾	115	80 ⁽²⁷⁾	102	0	52
	25	35	30	35	11	136

Tab. 12

$$35 \cdot 105 + 5 \cdot 96 + 3 \cdot 92 + 30 \cdot 99 + 0 \cdot 11 + 90 \cdot 25 + 80 \cdot 27 = 11\,811, \text{-- DM}$$

=====

Wir rechnen das optimale Programm wieder auf die ursprünglichen Einheiten zurück und bekommen für die Kapazitätsausnutzung der einzelnen Maschinen:

Maschine	Kapazität	Verbrauch	Nutzung
	[in Std]		
I	40	40	1
II	40	30	0,75
III	40	40	1

Maschine II nützt ihre Kapazität also nur zu 75 % aus.

Das Belegungsprogramm in Stücken ausgedrückt, ergibt sich, indem wir die Mengenangaben in Standardstunden aus Tab. 12 mit den Produktionszahlen pro Standardstunde multiplizieren, die für

A	B	C	D	
20	50	40	30	Stück betragen.

Die Aufträge werden dann auf die einzelnen Maschinen folgendermaßen verteilt:

	A	B	C	D
I		1750		150
II			120	900
III	500		1080	
	500	1750	1200	1050

Dabei zeigt sich, daß auf jeder Maschine zwei verschiedene Produkte hergestellt werden. Dies erfordert gewöhnlich eine bestimmte Umstellungszeit. Nun ist bei unserem Ansatz bisher offen gelassen worden, ob es sich bei den hergestellten Produkten um Gläser verschiedener oder gleicher Dicke handelt.

Im ersten Fall haben wir auch in der Glashütte eine gewisse Umstellungszeit zu berücksichtigen, die um so geringer ist, je kleiner die Dickenänderung ist. Diese Umrüstzeit - für eine bestimmte Zeit wird nur Ausschuß produziert - ist im Ansatz nicht berücksichtigt worden. Eine Beachtung scheint aber auch nur dann notwendig, wenn die Kosten der entstehenden Umrüstzeit größer sind, als etwaige Kostennachteile, die dadurch entstehen, daß man auf einer Maschine immer nur eine bestimmte Dicke herstellt. Dies hängt auch von der Gesamtauftragszusammenstellung in der Form ab, ob es möglich ist, eine Maschine über die gesamte Zeitdauer immer mit der gleichen Dicke "laufen" zu lassen. Meist wird es so sein, daß die Aufträge eine Vielzahl von Dicken umfassen, so daß in jedem Fall Umrüstungen notwendig sind. Daher bedeutet es keine Einschränkung der Anwendbarkeit des Verfahrens, wenn die notwendigen Umstellungen vorher abgeschätzt und bei den vorhandenen Kapazitäten berücksichtigt werden. Diese Vereinfachung verursacht natürlich eine Ungenauigkeit der Lösung, die aber praktisch nicht ins Gewicht fallen dürfte.

Für den Ansatz mit Aufträgen gleicher Dicke fällt keine Umrüstzeit an, so daß der Ansatz voll gültig ist.

Eine Formulierung in der hier dargestellten Form ist nur unter Zugrundelegung der Proportionalität möglich. Sollte diese Proportionalität nicht gegeben sein, so ist das Problem nicht unlösbar, sondern es bedarf nur eines etwas anderen Ansatzes und der Lösung mit Hilfe der Sim-

plexmethode. Das folgende Beispiel der optimalen Auswahl der Schneidverfahren ist in seinem mathematischen Ansatz auf unser jetziges Problem jederzeit anwendbar. Wir wollten nur, da die Lösung relativ einfach ist, diese Lösungsmöglichkeit mit der Transportmethode der Vollständigkeit halber andeuten.

II. Die optimale Belegung der Schneideinrichtungen

Nach dem Ziehen des Glases, bei dem es schon mit der richtigen Länge abgenommen worden ist, wird die Glastafel ins Schneidhaus gebracht, um dort auf die im Auftrag geforderten Maße zugeschnitten zu werden. Dazu steht im Schneidhaus eine Vielzahl von Schneidvorrichtungen¹⁾ zur Verfügung, die für die einzelnen Sorten verschieden gut zum Schneiden geeignet sind. Haben wir nun bestimmte gegebene Aufträge, so stellt sich die Frage, wie wir diese den einzelnen Schneidvorrichtungen zuteilen sollen, damit die vorhandenen Kapazitäten berücksichtigt werden und die Gesamtzeit des Ablaufs insgesamt ein Minimum wird. Die Fragestellung läßt sich auch ohne weiteres auf Kostenüberlegungen ausdehnen, wenn man davon ausgeht,

1) Der Vollständigkeit halber sollen sie einmal aufgezählt werden, obwohl sich der Leser nicht immer über die Funktionsweise im klaren sein wird:
Handkreuzschneidtisch - Hand-Streifentisch - Mechanischer Drehschneidtisch - Mechanischer Kreuzschneidtisch - Mechanischer Kreuzschneidtisch mit Abschieber und Brechtisch - Citalo-Schneidtisch (hierbei handelt es sich um eine belgische Entwicklung (Name), die einen automatischen Selbstaufleger und Brechtisch besitzt; der Citalo-Schneidtisch ist auf Maße und Stückzahlen programmierbar) - Abbrechschneidmaschine - Dickglashandschneidtisch mit Selbstaufleger - Streifenschneidmaschine - Kreuzschneidmaschine (System Linck) - Universal-Schneidmaschine (System Linck) - Mechanische Drehtisch-Schneidmaschine - Halbautomat (System Linck) - Jalousie-Glas-Schneidmaschine (System Linck) - Stutzmaschine - Digital-schneidtisch (Eigenentwicklung).

daß die Zeit zwar ein Zielkriterium darstellt, hierbei aber höherwertige Arbeitsmittel nicht beachtet werden. So schneidet eine mechanische Schneidmaschine schneller als ein Handschneider. Die Kosten können jedoch wegen der teuren Anschaffung und kurzen Lebensdauer höher sein, als beim Handschneiden.

Die Frage, ob Zeiten- oder Kostenminimierung erreicht werden soll, ändert nichts an der Problemformulierung und ist Gegenstand einer - uns hier nicht interessierenden - unternehmerischen Entscheidung.

1. Problemformulierung

Wir nehmen in unserem, aus rechentechnischen Gründen vereinfachten Beispiel¹⁾ an, daß vier verschiedene Produkte - Glas gleicher bzw. verschiedener Dicke mit unterschiedlichen Abmessungen - auf drei Schneidvorrichtungen bearbeitet werden sollen. Jede Schneidvorrichtung steht mit einer Kapazität von 400 Stunden zur Verfügung.²⁾ Die Aufträge A, B, C und D lauten auf 100, 50, 80 und 60 Einheiten (Kisten). Die Bearbeitungszeiten je Kiste sind in folgender Tabelle zusammengefaßt:³⁾

-
- 1) Natürlich bezieht sich eine realistische Ablaufplanung auf eine größere Anzahl von Produkten und Schneidvorrichtungen. Die Problemstellung wird dabei nicht verändert, während sich der Rechenaufwand beträchtlich steigert, so daß zur zeitgerechten Lösung gewöhnlich ein Computer verwendet werden muß.
 - 2) Es ist möglich, unterschiedlich hohe Kapazitäten anzunehmen, wobei auch mehrere gleichartige Maschinen zu einer Kapazität zusammengefaßt werden können.
 - 3) Aus technischen oder sonstigen Gründen sind Produkte auf bestimmten Schneidvorrichtungen nicht zu bearbeiten. Eine solche Einschränkung kann im mathematischen Ansatz Berücksichtigung finden.

Schneidvor- richtung	Produkt			
	A	B	C	D
I	2	3	5	4
II	4	5	5	3
III	3	4	6	5

Tab. 1

Es ist die Verteilung des Belegungsprogramms zu bestimmen, das den minimalen Gesamtzeitbedarf erfordert.

Das Problem läßt sich folgendermaßen formulieren:

$$\text{I } x_{11} \stackrel{1)}{> 0}, x_{12}, \dots, x_{34} \geq 0$$

$$\text{II } \left\{ \begin{array}{ll} 2x_{11} + 3x_{12} + 5x_{13} + 4x_{14} & \leq 400 \\ 4x_{21} + 5x_{22} + 5x_{23} + 3x_{24} & = 400 \\ 3x_{31} + 4x_{32} + 6x_{33} + 5x_{34} & = 400 \\ x_{11} & + x_{21} & + x_{31} & = 100 \\ x_{12} & & + x_{32} & = 50 \\ x_{13} & & & + x_{33} & = 80 \\ x_{14} & & & & + x_{34} & = 60 \end{array} \right.$$

$$\text{III } 2x_{11} + 3x_{12} + 5x_{13} + 4x_{14} + 4x_{21} + 5x_{22} + 5x_{23} + 3x_{24} + 3x_{31} + 4x_{32} + 6x_{33} + 5x_{34} \rightarrow \min$$

Um diese Aufgabe zu lösen, führen wir sie auf eine geeignete Normalform²⁾ zurück und erhalten mit der prima-

- 1) Hierbei bedeuten $x_{11} \dots x_{34}$ die hergestellten Produktmengen, wobei der erste Index die Maschine und der zweite die Produktsorte $A = 1, B = 2 \dots$ angibt.
- 2) Wir unterscheiden dabei zwei Grundtypen von Aufgaben: Maximal- und Minimalaufgaben, die über die Dualität miteinander verbunden sind. Maximalaufgaben/Minimalaufgaben haben folgendes Aussehen in Matrixschreibweise:
 - a) $x \geq 0$
 - b) $Ax \leq b \ (b \neq 0)$ Maximalaufgabe (Normalform)
 - c) $c^T x \rightarrow \max$

Fortsetzung siehe Seite 324

len bzw. dualen Simplexmethode¹⁾ nach mehreren Iterationen das Ergebnis. Dabei treten einige rechentechnische Probleme auf, die wir im Anschluß an diese Ausführungen in Form eines Exkurses klären wollen, ohne aber den ganzen mathematischen Hintergrund vollständig darzustellen.

Exkurs: Rechentechnische Probleme bei der Belegung der Schneidmaschinen²⁾

Zur Lösung unserer Matrix wollen wir die Simplexmethode benutzen. Allerdings bedarf es hierfür einiger Umformungen, da sich die Simplexmethode nur bei vorliegender Normalform anwenden läßt und unser Problem infolge der Bedingungsgleichungen und der minimalen Zielfunktion nicht der Normalfunktion entspricht.

Wir wollen nun an kleineren übersichtlicheren Beispielen die notwendigen Umwandlungen und Rechenregeln darstellen, bevor wir zum Schluß die nach den einzelnen Iterationen entstehenden Matrices unseres Problems aufführen.

(1) Die Normalform

Die Normalform liegt vor, wenn die Aufgabe in Matrizen-schreibweise folgendes Aussehen hat:

- a) $x \geq 0$
- b) $Ax \leq b$
- c) $c^T x \rightarrow \max$

2) Fortsetzung von Seite 323:

- a) $u \geq 0$
- b) $Du \geq b$ Minimalsaufgabe
- $s^T u \rightarrow \min$

Es muß jede Aufgabe zur Anwendung der allgemeinen Simplexmethode auf die Normalform (Maximalsaufgabe) gebracht werden. Ausnahmen sind, wie zu zeigen sein wird, möglich.

1) Die Unterschiede werden aufgezeigt.

2) Den folgenden Ausführungen legen wir die Darstellungen von Kreló, B.: a.a.O., S. 36 - 73 zugrunde.

Ein einfaches ausgeschriebenes Beispiel lautet dann

$$\begin{array}{ll}
 \text{a)} & x_1, x_2 \geq 0 \\
 & \begin{cases} 2x_1 + 4x_2 \leq 16 \\ 2x_1 + x_2 \leq 10 \\ 4x_1 \leq 16 \\ 4x_2 \leq 12 \end{cases} \\
 \text{b)} & \begin{cases} 2x_1 + 4x_2 + u_1 = 16 \\ 2x_1 + x_2 + u_2 = 10 \\ 4x_1 + u_3 = 16 \\ 4x_2 + u_4 = 12 \end{cases} \quad \text{oder} \quad \begin{cases} 2x_1 + 4x_2 + u_1 = 16 \\ 2x_1 + x_2 + u_2 = 10 \\ 4x_1 + u_3 = 16 \\ 4x_2 + u_4 = 12 \end{cases} \\
 \text{c)} & 2x_1 + 3x_2 \rightarrow \max \quad \quad \quad 2x_1 + 3x_2 \rightarrow \max
 \end{array}$$

Wir haben also das Maximum der Zielfunktion c innerhalb der Bedingungen a) und b) zu bestimmen. Wie wir z.B. beim Fertigungsprogramm gezeigt haben, gibt die Zielfunktion die Deckungsbeiträge wieder und die Ungleichungen unter a) und b) repräsentieren die Produktionsbedingungen.

Wir beginnen unsere Suche mit einem Ausgangsprogramm und nähern uns der Lösung schrittweise, indem wir die Produkte nacheinander ins Programm nehmen. Dabei ist es nützlich, wenn wir die Veränderungen der benutzten und unbenutzten Anteile der Einsatzgrößen beobachten.¹⁾ Daher führen wir neben den ursprünglichen Variablen x_1 und x_2 noch die Variablen u_1, u_2, u_3 und u_4 ein, die den nicht benutzten Rest der einzelnen Einsatzgrößen angeben. Wir nennen die ursprünglichen Variablen primale Variable und die neuen duale Variable, ohne letztere in der Matrix weiter zu berücksichtigen.²⁾

1) Den allgemeinen Ablauf haben wir bei der Bestimmung des optimalen Fertigungsprogramms schon dargestellt. Allerdings sind die dort angeführten Rechenregeln speziell auf die lineare Programmplanung zugeschnitten gewesen. Hier sollen auch mögliche Sonderfälle behandelt werden, weswegen wir eine etwas andere Darstellungsform wählen.

2) Die dualen Variablen werden in der Literatur auch als "Schlupfvariable", "Pseudovvariable", "verfügbare Aktivitäten" bezeichnet. Vgl. dazu Churchman, C.W. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations Research, a.a.O., S. 281

Unsere obige Aufgabe schreiben wir in Form eines Simplextableaus:

	x_1	x_2	
u_1	2	4	16
u_2	2	1	10
u_3	4	0	16
u_4	0	4	12
	2	3	0

Tab. 1

Dieses Tableau hat folgende drei allgemeine Eigenschaften:

- a) Der numerische Wert einer Variablen der ersten Spalte (hier $u_1 - u_4$) steht in der letzten Spalte. Dabei handelt es sich in der letzten Spalte um die in das Programm einbezogenen Variablen.
- b) Der numerische Wert einer Variablen der ersten Zeile ist gleich Null. Es sind dies die Werte der in das Programm nicht einbezogenen Variablen.
- c) In der rechten unteren Ecke steht der mit -1 multiplizierte Wert des Programms.¹⁾

Dieses Ausgangsprogramm stellt die Situation dar, daß $x_1, x_2 = 0$ und die Einsatzgrößen noch alle ungenutzt vorhanden sind. Das Programm wird jetzt so modifiziert, daß ein Produkt in die Produktion einbezogen wird. Es ist zweckmäßig, das Produkt mit dem höchsten Deckungsbeitrag (Gewinn) zu nehmen, und zwar in der größtmöglichen Menge, die die Kapazitäten der einzelnen Einsatzgrößen zulassen.

1) Anders als beim Fertigungsprogramm rechnen wir hier nicht mit einer, mit -1 multiplizierten Zielfunktion, sondern mit der wirklichen Zielfunktion, multiplizieren aber hier den Wert des Programms mit -1 . Beide Möglichkeiten führen letztlich zum gleichen Ergebnis, nur mit unterschiedlichen Vorzeichen. Die -1 Multiplikation wird einfach deswegen durchgeführt, damit alle Rechenregeln auch für den Wert des jeweiligen Programms gültig sind.

(2) Die Verbesserung des Programms

Der oben angedeutete Weg ergibt sich formal-mathematisch nach folgenden Regeln:

- Auswahl des Hauptelementes¹⁾ (Pivot)

- a) Das Hauptelement kann nur aus einer solchen Spalte ausgewählt werden, deren letztes Element positiv ist. Dies gilt vor allem bei gemischten Zielfunktionen. Ein negatives Element bringt nämlich keine Verbesserung des Programms.
- b) Das Hauptelement muß immer positiv sein.
- c) Das Hauptelement wird durch den kleinsten Quotienten aus den Zahlen der letzten Spalte mit den positiven Elementen in der Spalte des Hauptelements bestimmt; die Spalte des Hauptelements ergibt sich aus dem höchsten Deckungsbeitrag der letzten Zeile.

- Konstruktion des neuen Programms²⁾

Im neuen Programm (Simplextableau) werden nun im Vergleich zur Ausgangstabelle die Rollen der zum Hauptelement gehörenden Variablen vertauscht. Die Berechnung des neuen Tableaus läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

- d) An die Stelle des Hauptelements muß sein reziproker Wert treten. Im folgenden mit y bezeichnet.
- e) Die anderen Elemente der zu y gehörenden Zeile werden berechnet, indem die entsprechenden Elemente der gleichen Zeile der vorigen Tabelle mit y multipliziert werden.
- f) Die anderen Elemente der zu y gehörenden Spalte werden berechnet, indem die entsprechenden Elemente der gleichen Spalte der vorigen Tabelle mit $-y$ multipliziert werden. Die weiteren Elemente werden spaltenweise bestimmt, wobei das in der Spalte

1) Das Hauptelement wird auch als Pivot bezeichnet.

2) Die Grundlagen dieser hier aufgezeigten Regeln liegen in der Mathematik, speziell in der sogenannten Vektoren- und Matrizenrechnung. Eine einfache Darstellung des mathematischen Hintergrundes findet sich bei Hofmann, W.: Lehrbuch der Mathematik für Volks- und Betriebswirte. Differential, Integral, Vektor und Linear Programming-Bereich. Frankfurt/M. - Berlin 1967, S. 135 - 199 sowie bei Krekó, B.: a.a.O., S. 101 - 183

schon bekannte - nach Schritt f - Element mit d_i bezeichnet wird.

- g) Die anderen Elemente der zu d_i gehörenden Spalte werden berechnet, indem wir von den entsprechenden Elementen der vorigen Tableaus das Produkt von d_i mit dem entsprechenden Element der zum Hauptelement gehörenden Spalte des vorigen Tableaus subtrahieren.

Nach diesen Regeln ergibt sich folgendes neues Tableau:

	x_1	x_2	
u_1	2	4	16
u_2	2	1	10
u_3	4	0	16
$\leftarrow u_4$	0	(4)	12
	2	3	

Schritt a - c

	x_1	u_4
u_1		
u_2		
u_3		
x_2		0,25

Schritt d

	x_1	u_4	
u_1			
u_2			
u_3			
x_2	0	0,25	3

Schritt e: $0,25 \cdot 0 = 0$
 $0,25 \cdot 12 = 3$

	x_1	u_4	
u_1	-1		
u_2	-0,25		
u_3	0		
x_2	0	0,25	3
	-0,75		

Schritt f:

$$\begin{aligned} -0,25 \cdot 4 &= -1 \\ -0,25 \cdot 1 &= -0,25 \\ -0,25 \cdot 0 &= 0 \\ -0,25 \cdot 3 &= -0,75 \end{aligned}$$

	x_1	u_4	
u_1	-1		4
u_2	-0,25		7
u_3	-0		16
x_2	0	0,25	3
	-0,75		-9

$$\begin{aligned} 16 - 3 \cdot 4 &= 4 \\ 10 - 3 \cdot 1 &= 7 \\ 16 - 3 \cdot 0 &= 16 \\ 0 - 3 \cdot 3 &= -9 \end{aligned}$$

Schritt g:

	x_1	u_4	
$\leftarrow u_1$	② -1		4
u_2	2	-0,25	7
u_3	4	0	16
$\rightarrow x_2$	0	0,25	3
	2	-0,75	-9

$$\begin{aligned} 2 - 0 \cdot 4 &= 2^1) \\ 2 &= 2 \\ 4 &= 4 \\ z &= 2^2) \end{aligned}$$

Wir konstruieren nun das nächste Tableau nach den gleichen Schritten a - g und erhalten

	u_1	u_4	
$\rightarrow x_1$	0,5	-0,5	2
$\leftarrow u_2$	-1	① 0,75	3
u_3	-2	2	8
x_2	0	0,25	3
	-1	0,25	-13

Tab. 3

1) Durch $d_i = 0$ ergibt sich die gleiche Spalte wie beim vorigen Tableau.

2) Fußnote siehe Seite 330

Die optimale Lösung ist dann erreicht, wenn in der letzten Zeile kein positives Element mehr steht. In Tab. 3 haben wir ein weiteres positives Element in der letzten Zeile, also ist die optimale Lösung noch nicht erreicht.

Wir wiederholen a - g und erhalten

	u_1	u_2	
x_1	-1/6	2/3	4
u_4	-4/3	4/3	4
u_3	2/3	8/3	0
x_2	1/3	-1/3	2
	-2/3	-1/3	-14

Das ergebnis lautet: $x_1 = 4$, $x_2 = 2$, $z = 14$

(3) Die modifizierte Normalaufgabe

Wir haben bisher nur den Fall von Ungleichungen als Nebenbedingungen betrachtet. Nun gibt es aber in unserem speziellen Beispiel der Auftragsaufteilung auf die Schneidvorrichtungen sogenannte Bedingungsgleichungen. Das bedeutet, daß neben den Ungleichungen Gleichungen existieren, die von der Lösung unbedingt erfüllt sein müssen. Eine solche Aufgabe nennen wir eine modifizierte Normalaufgabe. Als Beispiel formulieren wir:

$$\begin{array}{ll}
 \text{a)} & x_1, \dots, x_4 \geq 0 \\
 \text{b)} & \begin{cases} 2x_1 + 4x_2 + x_3 \leq 100 \\ x_1 + 5x_3 + x_4 \leq 200 \\ x_2 + 4x_3 + 2x_4 = 200 \\ x_1 + x_2 + x_4 = 150 \end{cases} \\
 \text{c)} & 2x_1 - 2x_2 - x_3 + x_4 \rightarrow \text{Max}
 \end{array}$$

2) Fußnote von Seite 329:

Die Pfeile geben die ein- und austretenden Variablen wieder. Das umrandete Element stellt das neue Hauptelement dar.

Würden wir diese Aufgabe in ein Simplextableau übertragen und nach den vorher beschriebenen Schritten a - g lösen, so können die Variablen u_3 und u_4 auch positiv, d.h. durch keine $x_1 - x_4$ ersetzt und somit die letzten beiden Bedingungen als Gleichungen nicht erfüllt sein. Dies müssen wir, falls von der Lösung her überhaupt möglich, folgendermaßen zu vermeiden suchen.

Wir gehen von der Überlegung aus, daß eine duale Variable immer eine nichtnegative Zahl ist, die angibt, um wieviel die rechte Seite der entsprechenden Ungleichung größer ist als die linke Seite. Daher gilt:

$$\begin{array}{rcl} u_3 & = & 200 - (x_2 + 4x_3 + 2x_4) \geq 0 \\ u_4 & = & 150 - (x_1 + x_2 + x_4) \geq 0 \\ \hline u_3 + u_4 & = & 350 - (x_1 + 2x_2 + 4x_3 + 3x_4) \geq 0 \end{array}$$

Daraus folgt die Ungleichung

$x_1 + 2x_2 + 4x_3 + 3x_4 \leq 350$,
die mit ihrer oberen Grenze (350) unbedingt gegeben sein muß, wenn $u_3 = u_4 = 0$ werden soll. Nur so werden die letzten beiden Bedingungen unter b) als Gleichungen erfüllt. Ist dies nicht der Fall, so existiert kein zulässiges Lösungsprogramm. Diese Tatsache wird in Form einer sekundären Zielfunktion berücksichtigt. Die obige zusammengefaßte Ungleichung soll mit ihrem Wert 350 maximiert werden, d.h. wenn die sekundäre Zielfunktion erfüllt ist, ergibt sich mindestens ein Lösungsprogramm. Aus diesem Programm erhalten wir dann auch die ursprüngliche Zielfunktion. Lösungstechnisch läßt sich die Bestimmung beider Zielfunktionen zusammen vollziehen. Dabei gehen wir von nachstehendem Tableau aus:

	x_1	x_2	x_3	x_4	
u_1	2	4	1	0	100
u_2	1	0	5	1	200
u_3^*	0	1	4	2	200
u_4^*	1	1	0	1	150
	2	-2	-1	1	0
	1	2	4	3	350

Die dualen Variablen, die bei der optimalen Lösung fehlen müssen, werden mit * gekennzeichnet. Die letzte Zeile stellt obige Ungleichung dar, die wir aus der Addition von u_3 und u_4 erhalten haben. Das letzte Element zeigt das zu erreichende Maximum der sekundären Zielfunktion.

Zuerst wird das Maximum der sekundären Zielfunktion angestrebt. Dabei wird das letzte Element der untersten Zeile aufgrund des positiven Vorzeichens um soviel vermindert, wie der Wert der sekundären Zielfunktion vergrößert wird. Erreicht der Wert der sekundären Zielfunktion die kritische Zahl 350, nimmt das letzte Element der letzten Zeile den Wert 0 an.

Kann die Aufgabe gelöst werden, so wechseln die mit * bezeichneten dualen Variablen in die erste Zeile. Um die Möglichkeit zu vermeiden, daß eine solche Variable wiederum in das Programm einbezogen wird, läßt man die zugehörige Spalte dann einfach weg. Verfahren wir so, wird schließlich jedes Element der letzten Zeile - vorausgesetzt es gibt mindestens ein zulässiges Programm - gleich Null. Ist dies geschehen, so können wir unter Vernachlässigung der letzten Zeile mit der ersten Zielfunktion weiterfahren.

Der Lösungsweg ergibt sich aus folgenden Matrices:

	x_1	x_2	x_3	x_4	
u_1	2	4	1	0	100
u_2	1	0	5	1	200
u_3^*	0	1	4	(2)	200
u_4^*	1	1	0	1	150
	2	-2	-1	1	0
	1	2	4	3	350

	x_1	x_2	x_3	
u_1	2	4	1	100
u_2	1	-0,5	3	100
x_4	0	0,5	2	100
u_4^*	1	0,5	-2	50
	2	-2,5	-3	-100
	1	0,5	-2	

	x_2	x_3	
u_1	3	(5)	0
u_2	-1	5	50
x_4	0,5	2	100
x_1	0,5	-2	50
	-3,5	1	200
	0	0	0

	x_2	u_1	
x_3	0,6	0,2	0
u_2	-4	-1	50
x_4	-0,7	-0,4	100
x_1	1,7	0,4	50
	-4,1	-0,2	-200

u_3^* und u_4^* sind entfallen. Die Elemente der letzten Zeile sind Null. Diese Zeile wird nicht mehr aufgenommen.

Im übrigen brauchen wir die Koeffizienten der sekundären Zielfunktion nicht unbedingt aufschreiben, da sie sich - solange solche gekennzeichneten Zeilen überhaupt vorhanden sind - ohne weiteres im Kopf berechnen lassen, wenn wir die Elemente der mit u^* gekennzeichneten Zeilen spaltenweise addieren.

Das Ergebnis lautet dann:

$$x_1 = 50; x_2 = 0; x_3 = 0; x_4 = 100;$$

$$u_1 = 0; u_2 = 50; u_3 = 0; u_4 = 0; z = 200.$$

(4) Ein Minimum als Zielfunktion

Bisher haben wir in unseren Aufgaben immer ein Maximum als Zielfunktion gesucht. Nun ist aber auch ein Minimum als Zielfunktion möglich.

Dazu betrachten wir das Beispiel:

$$a) \quad x_1; \quad x_2; \quad x_3; \quad \geq 0$$

$$b) \quad \begin{cases} x_1 + x_2 + 2x_3 \leq 12 \\ 2x_1 - 4x_2 - x_3 \geq 8 \end{cases} \quad 1)$$

$$c) \quad 2x_1 - 2x_2 - 3x_3 \rightarrow \text{Min}$$

Diese Aufgabe läßt sich folgendermaßen lösen:

Ungleichung 2 unter b) kann durch Einführung einer neuen nichtnegativen Variablen zu einer Gleichung umgestaltet werden. Dabei bedeutet die neue Variable v_2 die nicht-negative Größe, die angibt, um wieviel die Summe $2x_1 - 4x_2 - x_3$ größer als 8 ist. Diese Ungleichung kann dann, bei gleichzeitiger Berücksichtigung der neuen Variablen in der Zielfunktion, in folgende Gleichung umgeformt werden:

$$2x_1 - 4x_2 - x_3 - v_2 \stackrel{2)}{=} 8$$

Für diese Art von Bedingungsgleichung haben wir im letzten Beispiel die Lösungsmethode entwickelt.

Die Minimumfunktion können wir durch Multiplikation mit

1) Der Vollständigkeit halber wollen wir auch das Beispiel einer $\geq$ -Ungleichung anführen.

2) Der Index von v gibt an, daß die Variable zur 2. Bedingung von b) gehört.

-1 in eine Maximumfunktion umwandeln. Das ergibt die neue Aufgabenformulierung:

a) $x_1, x_2, x_3, v_2 \geq 0$

b) $x_1 + x_2 + 2x_3 \leq 12$
 $2x_1 - 4x_2 - x_3 - v_2 = 8$

c) $-2x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 0v_2 \rightarrow \text{Max}$

Die Berechnung kann dann dementsprechend durchgeführt werden.

	x_1	x_2	x_3	v_2	
u_1	1	1	2	0	12
u_2^* (2)	-4	-4	-1	-1	8
	-2	2	3	0	0
	2	-4	-1	-1	8

	x_2	x_3	v_2	
u_1	3	2,5	0,5	8
x_1	-2	-0,5	-0,5	4
	-2	2	-1	8
	0	0	0	0

	x_2	u_1	v_2	
x_3	1,2	0,4	0,2	3,2
x_1	-1,4	-0,2	-0,4	5,6
	-4,4	-0,8	-1,4	1,6

Das optimale Programm ist damit:

$x_1 = 5,6; x_2 = 0; x_3 = 3,2; u_1 = 0; v_2 = 0$

Für dieses Programm hat die zu maximierende Funktion

$$- 2x_1 + 2x_2 + 3x_3 + 0v_2 = 1,6.$$

Der Wert der ursprünglich zu minimierenden Funktion beträgt damit:

$$2x_1 - 2x_2 - 3x_3 = 1,6$$

=====

Ist es notwendig, mehrere v-Variable einzuführen, so erweist sich der eben angeführte Lösungsweg als recht umständlich. Beachten wir die Dualität des "Linear Programming", so läßt sich jede Minimalaufgabe in eine duale Maximalaufgabe (und umgekehrt) umwandeln. In den entsprechenden dualen Aufgaben treten dieselben Konstanten auf, nur sind dann die Rollen der Zeilen und Spalten vertauscht.¹⁾ Auf diese Problematik wollen wir aber hier nicht weiter eingehen, obwohl sich daraus interessante betriebswirtschaftliche Zusammenhänge ableiten lassen.²⁾

Wir wollen vielmehr - bevor wir die Matrices unserer Aufgabe angeben - die Aufmerksamkeit der Tatsache zuwenden, daß sich in unserer mit -" berücksichtigten Maximumzielfunktion nur Minuszahlen befinden.³⁾ Dadurch ergeben sich Schwierigkeiten bei der Auswahl des Hauptelements.

Wählen wir dabei ohne Berücksichtigung der Regel a)⁴⁾ in Kap. (2) dieses Exkurses nur das größte Element, so be-

1) Mathematisch spricht man von einer transformierten Matrix; sie wird um 90° gekippt.

2) Vgl. Beckmann, M.J.: Lineare Planungsrechnung a.a.O., S. 33 - 36 und unsere Ausführungen in Teil 2/C II - Über die Grenzgewinne.

3) Vgl. Tab. 1 der folgenden Matrices (Kap. (5))

4) Tatsächlich handelt es sich bei dieser Regel nur um eine Erfahrungstatsache, die in bestimmten Spezialfällen unbeachtet bleiben kann.

ginnen wir aufgrund der mathematischen Definition mit -2 und wenden die dort herausgearbeiteten Regeln wie bei der Normalaufgabe an.

In Tab. 2 und in allen folgenden vernachlässigen wir die größeren korrigierten Elemente der Zielfunktion und fahren nach dem gleichen Prinzip mit den durch die erste Transformation unkorrigierten Elementen fort. Die korrigierten Elemente sind mit Kreisen gekennzeichnet. Mit diesem Trick verhindern wir eine Ausartung¹⁾ des Problems, bei dem wir z.B. nur wieder die Variable x_{11} durch x_{31} ersetzen könnten. Unsere Aufgabe muß aber vor allem darin bestehen, die u^* zum Verschwinden zu bringen und damit die Bedingungsgleichungen der sekundären Zielfunktion zu beachten. Die Erfüllung dieser sekundären Zielfunktion gibt uns auch das Kriterium, wenn wir eine optimale Lösung erreicht haben - es braucht allerdings nicht die einzige zu sein.²⁾

(5) Die optimale Schneidhausbelegung

Die folgenden Matrices geben den Lösungsweg unserer Schneidhausbelegung wieder:

-
- 1) Degenerationsprobleme sollen hier nicht näher besprochen werden, da sie uns zu weit in die mathematische Behandlung führen würden. Für die Berechnung eines jeden größeren praktischen Problems erscheint die Mithilfe eines Mathematikers sowieso angebracht. Über Degenerationsprobleme vergleiche allgemein: Krelle, W. - Künzi, H.P.: Lineares Programmieren. Zürich 1958, S. 19, S. 30, S. 73 - 76; Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung ..., a.a.O., S. 130 - 138; Winkel, H.: Die Entartung linearer Planungsaufgaben. In: ZfB 1960 (30), S. 223 - 230
 - 2) Neben dieser hier geschilderten primalen Simplexmethode gibt es noch eine sogenannte duale Simplexmethode, die besonders bei negativen b-Werten und negativer letzter Zeile auch in Kombination mit der primalen Simplexmethode angewandt wird. Beide Verfahren haben den gleichen Lösungsweg, aber Unterschiede in der Bestimmung der Hauptelemente. Vgl. Kerkó, B.: a.a.O., S. 223 - 227

	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	
u_1	2	3	5	4	-2				-2				400
u_2					4	5	5	3					400
u_3									3	4	6	5	400
$\leftarrow u_4^* (1)$					1				1				100
u_5^*		1				1				1			50
u_6^*			1				1				1		80
u_7^*				1				1				1	60
	-2	-3	-5	-4	-4	-5	-5	-3	-3	-4	-6	-5	0

Tab. 1

	u_4	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	
u_1	-2	3	+5	4	-2	-3			-2	-3			200
u_2					4	5	5	3					400
u_3									3	4	6	5	400
$\rightarrow x_{11}$	1				1				1				100
$\leftarrow u_5^* (1)$						1				1			50
u_6^*			1				1				1		80
u_7^*				1				1				1	60
	+2	-3	-5	-4	(-2)	-5	-5	-3	(-1)	-4	-6	-5	+200

Tab. 2

	u_4	u_5	x_{13}	x_{14}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	
u_1	-3		5	4	-2	-3			-2	-3			50
u_2					4	5	5	3					400
u_3									3	4	6	5	400
x_{11}					1				1				100
$\rightarrow x_{12}$		1				1				1			50
u_6^*			1				1				1		80
$\leftarrow u_7^* (1)$				1				(1)				1	60
	+3	-5	-4	(-2)	(-2)	-5	-3	(-1)	(-1)	-6	-5		+350

Tab. 3

	u_4	u_5	x_{13}	x_{14}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	u_7	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	
$\leftarrow u_1$			(5)	4	-2	-3			-2	-3			50
u_2				-3	4	5	5	-3				-3	220
u_3									3	4	6	5	400
x_{11}					1				1				100
x_{12}						1				1			50
u_6^*		1					1				1		80
$\rightarrow x_{24}$				1				1				1	60
	-5		(-1)	(-2)	(-2)	(-2)	-5	+3	(-1)	(-1)	-6	(-2)	530

Tab. 4

	u_4	u_5	u_1	x_{14}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	u_7	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	
$\rightarrow x_{13}$				0,2	0,8	-0,4	-0,6		-0,4	-0,6			10
$\leftarrow u_2$				-3	4	5	(5)					-3	220
u_3									3	4	6	5	400
x_{11}					1				1				100
x_{12}						1				1			50
u_6^*		-0,2	-0,8	+0,4	+0,6	1		+0,4	+0,6	1			70
x_{24}				1								1	60
	(+1)	(+3)	(-4)	(-5)	(-5)	-5		(-3)	(-4)	-6	(-2)		580

Tab. 5

	u_4	u_5	u_1	x_{14}	x_{21}	x_{22}	u_2	u_7	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	
x_{13}				0,2	0,8	-0,4	-0,6		-0,4	-0,6			10
$\rightarrow x_{23}$				-0,6	0,8	1	0,2					-0,6	44
u_3									3	4	6	5	400
x_{11}					1				1				100
x_{12}						1				1			50
$\leftarrow u_6^*$		-0,2	-0,2	-0,4	-0,4	-0,2		+0,4	+0,6			+0,6	26
x_{24}				1								1	60
	(+1)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1)		(-3)	(-4)	-6	(-5)		800

Tab. 6

	u_4	u_5	u_1	x_{14}	x_{21}	x_{22}	u_2	u_7	x_{31}	x_{32}	u_6	x_{34}
x_{13}			0,2	0,8	-0,4	-0,6			-0,4	-0,6		10
x_{23}				-0,6	0,8	1	0,2				-0,6	44
u_3			+1,2	+1,2	+2,4	+2,4	+1,2		0,6	0,4	-6	1,4 244
x_{11}					1				1			100
x_{12}						1				1		50
$\rightarrow x_{33}$			-0,2	-0,2	-0,4	-0,4	-0,2		0,4	0,6	1	0,6 26
x_{24}				1								1 60
			-0,2	-1,2	-2,4	-2,4	-1,2		-0,6	-0,4	+6	-1,4 956

Tab. 7

Ergebnis:

$x_{13} = 10$; $x_{23} = 44$; $x_{11} = 100$; $x_{12} = 50$; $x_{33} = 26$;
 $x_{24} = 60$; $u_3 = 244$, d.h. Maschine III hat noch eine Kapazität von 244 Std. zur Verfügung.

2. Problemlösung und kritische Würdigung

Die im Exkurs durchgeführten Rechnungen haben folgendes Ergebnis erbracht:

	Produkte			
	A	B	C	D
Schneidvorrichtungen				
I	100	50	10	
II			44	60
III			26	
	100	50	80	60

Zur Erledigung der Aufträge benötigen wir 936 Arbeitsstunden, wobei die Schneidvorrichtung III noch 244 Kapazitätsstunden zur Verfügung hat. Sie können zu einem Anschlußauftrag verwendet werden.

Umstellzeiten der Schneidvorrichtungen sind bei diesem Ansatz, entsprechend dem Beispiel der Ziehmaschinenbelegung, nicht berücksichtigt worden. Ähnlich wie dort, könnten die Umstellzeiten durch Schätzungen im Planungsansatz Beachtung finden. Andererseits ist es so, daß die Zeiten der Umrüstungen verglichen mit den Schneidzeiten so relativ gering sind, daß ein Nichtansatz im praktischen Gebrauch nicht ins Gewicht fällt.¹⁾ Außerdem ist bei einigen Schneidtischen eine Umrüstung überhaupt nicht notwendig. Der Nichtansatz von Umrüstzeiten hat also auf die Anwendungsmöglichkeit keinen, bzw. einen nicht beachtlichen Einfluß.

Wie schon einmal kurz angedeutet, kann im Problemansatz auch berücksichtigt werden, daß einzelne Sorten auf bestimmten Schneidvorrichtungen nicht geschnitten werden können bzw. sollen. In der Ausgangsmatrix entfallen dann die entsprechenden Spalten. Mit dieser Möglichkeit ergibt sich eine weitere modellmäßige Anpassung an die Wirklichkeit. Man kann also alle Sorten nur auf die dafür vorgesehenen Schneidvorrichtungen verteilen.

Die betriebliche Anwendung bedingt eine stockungsfreie Bereitstellung des für die Aufträge notwendigen Glases sowie eine Kenntnis der vorhandenen Kapazitäten. Unvorhergesehene Ausfälle durch Krankheit, Unfall etc. können durch Bereithalten von Reservekapazitäten ausgeglichen werden. Diese Schwierigkeiten sind aber bei der intuiti-

1) Nur wenn nach jeder Tafel - nicht wie üblich nach mehreren Kisten - eine Längen- und Breitenänderung der Schneidvorrichtungen erfolgen würde, müßte die Umrüstzeit in den mathematischen Ansatz aufgenommen werden. Dies wird aber schon von der betrieblichen Praxis ausgeschlossen, denn solche Einzelaufträge - falls überhaupt erteilt - werden vom Handschneider erledigt. Im übrigen sind die Umrüstungen bei einem nach obigen Methoden errechneten Programm gegenüber der intuitiven Aufteilung erfahrungsgemäß sowieso beträchtlich reduziert.

ven Verteilung ebenfalls zu meistern. Beim operations-analytischen Ansatz erfordern kurzfristig auftretende, aber länger wirkende Kapazitätsänderungen eine neue Berechnung. Die für die Berechnung notwendigen Daten lassen sich, soweit nicht schon in anderem Zusammenhang vorhanden, ohne größere Schwierigkeiten beschaffen. Es handelt sich hierbei um Zeitaufnahmen an den verschiedenen Schneidvorrichtungen für die unterschiedlichen Tafelgrößen. Die dabei entstehende riesige Anzahl von Verarbeitungsdaten und die Notwendigkeit, die Berechnungen innerhalb kürzester Zeit - oft Stunden - durchführen zu müssen, bedingen die Verwendung eines Computers.

Insgesamt gesehen, eröffnet sich mit der behandelten optimalen Belegung der Schneidvorrichtung ein Gebiet, das aufgrund seines begrenzten Umfangs und der leichten Überschaubarkeit,¹⁾ unseres Erachtens eine praktische Anwendung operationsanalytischer Verfahren unter den gemachten Einschränkungen erlauben würde. Innerhalb der Glasfertigung ließe sich dabei mit verhältnismäßig geringem Aufwand - verglichen mit einer ebenfalls notwendigen konventionellen Arbeitsvorbereitung - ein Optimum mit minimaler Durchlaufzeit oder bei einem anderen Ansatz mit minimalen Schneidkosten für die Auftragsverteilung auf die Schneidvorrichtungen garantieren.

III. Die optimale Transportplanung

Innerhalb der Fertigungsablaufplanung kann gegebenenfalls der Transportplanung eine besondere Bedeutung zukommen. Da wir bei der Glasfertigung infolge der Weiträumigkeit der einzelnen Fertigungsvorgänge auch größere Transportaufgaben zu erfüllen haben, wollen wir untersuchen, ob wir bei der Transportplanung operationsanalytische Verfahren anwenden können.

1) Vgl. dazu die allgemeinen Kriterien der Anwendbarkeit Teil 1/C/I

1. Voraussetzungen eines Transportmodells in der Glasfabrik

Wie wir im theoretischen Teil unserer Arbeit schon angedeutet haben, ist es möglich, innerhalb der Ablaufplanung das in der Literatur häufig angeführte "Transportmodell" bei Vorliegen aller Voraussetzungen anzuwenden.

Dabei sollen die Halberzeugnisse von gewissen "Quellen" - wo bestimmte Vorräte vorhanden sind - zu Weiterverarbeitungsplätzen - wo verschiedene Mengen verlangt werden - so verschickt werden, daß eine Zielfunktion (Gesamtzeit, Transportkosten) minimiert wird.

Nun tritt eine solche Situation innerhalb der Glasfertigung nur dann auf, wenn wir

- räumlich getrennte Produktionsstätten vorfinden, d.h. innerhalb eines Betriebes mindestens zwei oder mehr Wannenkomplexe zur Erzeugung von Rohglas
- und davon räumlich getrennte Weiterverarbeitungsbetriebe, z.B. verschiedene Schneidabteilungen, haben.

Es gibt innerhalb der hier beschriebenen Unternehmung wirklich ein Werk, das zwei Wannen in Betrieb hat,¹⁾ und bei dem dann eine solche Modellbildung wenigstens theoretisch möglich wäre. Die hierbei auftretenden Zuteilungsprobleme lassen sich aber, wegen der leichten Überschaubarkeit, auch ohne Operations Research durch einfache kombinatorische Überlegung lösen.

Wir können also feststellen, daß eine Anwendung operationsanalytischer Methoden theoretisch möglich ist, auf-

1) Bei einem 2. Betrieb steht neben der produzierenden Wanne eine zweite in Reserve, die bei Bedarf in Anspruch genommen werden könnte.

grund der besonderen Übersichtlichkeit der gegebenen Verhältnisse aber praktisch nicht stattzufinden braucht.

Zum anderen bleibt in unserem speziellen Ansatz die Frage bestehen, ob es sich überhaupt lohnt, für die Lösungen dieses Problems die erforderlichen Aufwendungen der Datenerfassung und -verarbeitung zu machen, da es sich bei den Werten der Zielfunktion nur um relativ geringe absolute Beträge handeln würde. Erst wenn die räumlichen Entfernungen größer werden - die absoluten Transportkosten also steigen - oder innerhalb einer allgemeinen Fertigungsablaufplanung etwa das Zeitmoment besonders berücksichtigt werden soll, könnten wir die praktische Anwendung befürworten.

Eine Anwendung ist somit unter den individuellen Gegebenheiten nur beschränkt möglich. Da dies aber bei anderen Unternehmen gleicher Branche nicht der Fall zu sein braucht, wollen wir zur Abrundung unserer Ausführungen wenigstens einen Problemansatz für drei Produktionsstätten und fünf räumlich getrennte Weiterverarbeitungsbetriebe aufzeigen, der die grundsätzlich mögliche Anwendung andeutet.¹⁾

2. Problemformulierung²⁾

Wir wollen annehmen, daß ein Unternehmen drei Betriebe

1) Die Transportplanung wird von besonderer Bedeutung, wenn etwaige entfernt liegende Veredelungsbetriebe beliefert werden sollen. So haben wir auch in unserem speziellen Fall Tochterunternehmen bzw. Veredelungsbetriebe, die in, zum Teil absatzorientierten, meist aber an historisch gewachsenen Standorten, Rohprodukte weiterverarbeiten. Die beschränkte Anzahl ermöglicht auch hier eine optimale Lösung ohne operationsanalytische Methoden, rechtfertigt aber auch den folgenden Problemansatz.

2) Das Beispiel entstammt Ferguson, R.O. - Sargent, I.F.: a.a.O., S. 25 - 38

bzw. Produktionsstätten B_1 , B_2 und B_3 besitzt, die räumlich getrennt liegen und

$a_1 = 60$, $a_2 = 35$ und $a_3 = 40$ Stück¹⁾

herstellen. Es sollen fünf Weiterverarbeitungsstätten ($K_1, K_2 \dots K_5$), die

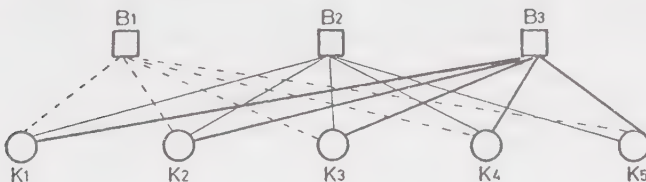
$b_1 = 22$, $b_2 = 45$, $b_3 = 20$, $b_4 = 18$, $b_5 = 30$ Stück

pro Zeitraum benötigen und ebenfalls räumlich getrennt liegen, beliefert werden.

Die Kosten, die pro Stück zwischen Versandort und Bestimmungsort entstehen, sind in nachstehender Matrix angegeben.²⁾

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
B_1	4	1	3	4	4
B_2	2	3	2	2	3
B_3	3	5	2	4	4

Die möglichen Transportbeziehungen lassen sich formal in nachstehendem Schema veranschaulichen:



1) Die nähere Spezifizierung lassen wir bei diesem Problem offen; ebenfalls soll der Zeitraum unbestimmt bleiben, für den die Planung gilt.

2) Ebenso ließe sich eine Zeitmatrix bei einer Gesamtzeitenoptimierung aufstellen. Die Höhe der Kosten ist dabei unabhängig von der Zahl der transportierten Einheiten, d.h. es wird keine Mengendeckung angenommen.

Jedem dieser möglichen Transportwege kann nun innerhalb der Anforderungen b_j und Produktion a_j eine Menge x_{ij} so zugeordnet werden, daß die Gesamtkostenfunktion minimiert wird.

Dies ergibt folgendes Tableau:

	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	
B_1	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	60
B_2	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	35
B_3	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	40
	22	45	20	18	30	135

$$\begin{aligned}
 \text{Die Zeilen } x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} &= 60 \\
 x_{21} + x_{22} + x_{23} + x_{24} + x_{25} &= 35 \\
 x_{31} + x_{32} + x_{33} + x_{34} + x_{35} &= 40
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{und Spalten } x_{11} + x_{21} + x_{31} &= 22 \\
 x_{12} + x_{22} + x_{32} &= 45 \\
 x_{13} + x_{23} + x_{33} &= 20 \\
 x_{14} + x_{24} + x_{34} &= 18 \\
 x_{15} + x_{25} + x_{35} &= 30
 \end{aligned}$$

bilden die Begrenzungsbedingungen, die mit den Kosten optimal zu bestimmen sind:

$$Z \Rightarrow \min = 4x_{11} + x_{12} \dots 4x_{34} + 4x_{35} \quad 1)$$

Es gilt weiter $x_{ij} \geq 0$.

Bei dieser Aufgabe ist eine Entscheidung so zu treffen, daß

- (1) die Kapazität jedes Werkes vollständig ausgenutzt wird,

1) Wir haben hier auf eine allgemein formale Darstellung verzichtet, da sie unserem Ziehmaschinenbelegungsproblem entspricht.

- (2) jeder Kunde die bestellte Menge erhält,
- (3) die Transportkosten minimiert werden.¹⁾

Die Lösung errechnet sich mit Hilfe der in Kapitel I des Abschnittes "D" dargelegten Methoden mit:²⁾

	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅	
B ₁		45			15	60
B ₂	2			18	15	35
B ₃	20		20			40
	22	45	20	18	30	

Dabei verschicken wir die in B₁ hergestellten Produkte nach K₂ (45) und K₅ (15). Die in B₂ produzierten nach K₁ (2), K₄ (18) und K₅ (15) und von B₃ nach K₁ (20) und K₃ (20). Dem entspricht das Transportkostenminimum von $45 \cdot 1 + 15 \cdot 4 + 2 \cdot 2 + 18 \cdot 2 + 15 \cdot 3 + 20 \cdot 3 + 20 \cdot 2 = 290,--$ DM, wobei alle Begrenzungen erfüllt sind.

3. Erweiterungen und kritische Würdigung

Wie sich leicht am praktischen Fall beweisen läßt, beinhaltet nicht jedes Transportproblem eine Anwendungsmöglichkeit für operationsanalytische Verfahren. Es gibt viele praktische Schwierigkeiten, die sich durch ein Transportmodell nicht ohne weiteres erfassen lassen. Im Einzelfall wird es vorkommen, daß bei bestimmten Problemen Schnelligkeit und Pünktlichkeit der Transportmittel mehr ins Gewicht fallen, als etwa die Kosten selbst.

1) Vgl. Wetzel, W.: Lineare Verteilungsmodelle in der Betriebswirtschaft - Beispiel für den praktischen Einsatz der Linearplanung in Unternehmungen. In: Ufo 1956 (1), S. 46

2) Vgl. dazu Ferguson, R.O. - Sargent, L.F.: a.a.O., S. 24 - 37

Hierzu ließe sich dann ein obigem Ansatz ähnliches Modell mit Zeitelementen zugrundelegen, soweit es gelingt, die Kriterien Pünktlichkeit und Zuverlässigkeit quantitativ zu fassen.

Unterschiedliche Größen der Transportmittel lassen sich in einem erweiterten Ansatz berücksichtigen. Das Problem, aus einer Anzahl verschiedenartiger Transportmittel mit unterschiedlichen Wirkungsgraden einen optimalen Transportplan zu entwickeln, kann man gegebenenfalls mit einem Zuordnungsmodell¹⁾ lösen.

Insgesamt läßt sich aber feststellen, daß es innerhalb der Produktion gewöhnlich eine nur beschränkte Anwendungsmöglichkeit gibt, da die Fertigung aus Ablaufgesichtspunkten heraus geradezu Wert darauf legt, eine räumliche Trennung zu vermeiden. Viel eher - und aus diesem Gebiet stammen auch die meisten Beispiele²⁾ - ist die Anwendung bei der Verteilung von Fertigprodukten auf absatzorientierte Auslieferungslager gegeben, wobei auch die genaue Bestimmung der b_j - der Nachfragemengen der Bestimmungsorte - als Problem entfällt.

Ein etwas anders geartetes Transportproblem tritt noch bei der Glasfertigung auf. Dort haben wir eine räumliche

1) Vergleiche im folgenden Kapitel: Bereitstellungsplanung das Beispiel über die Zuordnung von Arbeiten (Aufträgen) auf Schneidvorrichtungen. Es entspricht formal dem angedeuteten Modell.

2) Vgl. die Beispiele der Heinz, H.J. Company in den USA bei Henderson, A. - Schlaifer, R.: Mathematical Programming: Better Information for Better Decision Making. In: Harvard Business Review 1954 (32), H. 3, S. 74 - 100, hier S. 77; der Kohlenbergwerke in England: Stravs, A.: Das optimale Sortiment eines Fabrikationsbetriebes. In: Industrielle Organisation 1958 (27), S. 205 - 212, besonders S. 211.

Nach eigenen Erkundigungen existieren auch bei deutschen Ölgesellschaften solche Modelle.

Konzentration der Fertigung (z.B. Ziehbühne), von der aus die einzelnen Einheiten (Glasböcke) auf die getrennt liegenden Weiterverarbeitungsabteilungen (Schneidabteilungen) verteilt werden, wobei die Zahl der Transportmittel - um einen reibungslosen Abtransport zu gewährleisten - optimal sein soll. Zur Bewältigung dieser Aufgabe kann man die Warteschlangentheorie verwenden.¹⁾

4. Die Optimierung der Anzahl der Transportmittel mit Hilfe der Warteschlangentheorie²⁾

Bei der Anwendung der Warteschlangentheorie zur Optimierung der Transportmittellanzahl können wir von folgender betrieblichen Situation ausgehen.³⁾

Auf der Ziehbühne wird das Glas nach vorgegebenen Längen abgenommen und auf sogenannte Glasböcke gestellt. Ist ein solcher Bock voll, wird er zum genauen Zuschnitt ins Schneidhaus gebracht.⁴⁾ Dies geschieht mit Transportmitteln, die das gestapelte Glas tragend oder ziehend - je nach Art der Böcke - abtransportieren. Stehen nun nicht

-
- 1) Eigentlich handelt es sich beim folgenden Beispiel nicht mehr um ein Ablaufplanungsmodell, sondern schon um ein Bereitstellungsplanungsproblem, das aber wegen der Interdependenz der beiden Bereiche hier behandelt werden soll.
 - 2) Die hier beschriebene Situation hat sich in der langjährigen betrieblichen Praxis unter Umständen von selbst auf einen optimalen Punkt eingependelt, so daß eine Berechnung wahrscheinlich keine wesentlich anderen Ergebnisse erbringt. Unsere Aufgabe besteht aber nicht darin, nur verbesserungswürdige Situationen zu schildern, sondern allgemeine Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen, die nicht nur bei bereits bestehenden Betrieben, sondern auch bei Neuplanungen Verwendung finden können.
 - 3) Unsere Überlegungen orientieren sich an einem Beispiel bei Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 371 - 374
 - 4) Unter Umständen kann er auch gleich zum Versand gehen.

genügend Transportmittel zur Verfügung, so bilden sich Warteschlangen¹⁾ von Glasböcken auf der Ziehbühne. Solche nicht abtransportierte Glasböcke stören den Produktionsablauf nicht unbeträchtlich; daher muß man bemüht sein, immer genügend Transportmittel zum Abtransport bereitzuhalten. Andererseits sollen es natürlich wiederum nicht zu viele sein, damit sie nicht ohne Beschäftigung sind und unnötige Kosten verursachen.

Wir wollen nun zunächst untersuchen, wie viele Glasböcke durchschnittlich zum Abtransport pro 24 Stunden bereitstehen. Dieser Durchschnitt kann beträchtlich streuen. Er ist z.B. davon abhängig, wie viele Ziehmaschinen überhaupt in Betrieb sind, welche Glasdicken hergestellt werden - dies beeinflußt die Ziehgeschwindigkeit -, welche Längen geschnitten werden und welche Bockgrößen Verwendung finden. Haben wir Unterlagen über die Produktion in der Form, daß sich daraus die Zahl der abzutransportierenden Böcke entnehmen läßt, so bestimmen wir, wie die Anzahl der Böcke pro Tag (24 Std) im Laufe des letzten Jahres gestreut hat und drücken die Streuung durch die Standardabweichung der Zahl der Abtransporte aus. Die Verteilung der Anzahl der Abtransporte kann dabei die verschiedensten Formen aufweisen. Unterstellen wir hier einmal eine Normalverteilung mit dem Mittelwert von 1000 Böcken pro Tag und einer Standardabweichung von ($\pm$) 100 Böcken. Das bedeutet, daß die durchschnittliche Zugangsrate $\lambda = 1000$ pro Tag ist. Als nächstes ist die durchschnittliche Anzahl der Böcke zu bestimmen, die pro Transportmittel abtransportiert werden können (durchschnittliche Abgangsrate μ). Diese Abgangsrate ist nicht konstant, sondern gleichfalls einer Streuung unterworfen.²⁾ Wir nehmen an, die Analyse ergebe auch eine Nor-

1) Darunter versteht man allgemein wartende Einheiten, die keiner bestimmten Ordnung unterworfen zu sein brauchen.

2) Ursache sind hier die verschieden großen Transportentfernungen sowie etwaige Stauungen vor den Transportaufzügen.

malverteilung mit einem Durchschnitt von 200 und einer Standardabweichung von ($\pm$) 20. Die durchschnittliche Abgangsrate eines Transportmittels sei $u = 200$ pro Tag (24 Std).

Um zu bestimmen, wie viele Transportmittel wir haben sollten, brauchen wir noch zwei Informationen.

Der Betrieb eines Transportmittels soll DM 200.--/Tag kosten. Der Überhang zwischen abzutransportierenden und abtransportierbaren Einheiten soll pro Tag mit Überstunden von 10.-- DM pro Stunde ausgeglichen werden. Dabei hängt die Anzahl der erforderlichen Überstunden von der Abgangsrate des betreffenden Tages ab.

Nun vergleichen wir die mit Hilfe von Zufallzahlen anfallenden Konstellationen für eine verschiedene Zahl von Transportmitteln, wobei wir nach der kostengünstigsten Lösung suchen.

Dazu verwenden wir nachfolgende Tabelle.¹⁾ (Tabelle siehe Seite 352)

Die Anwendung der Tabelle bedarf einiger Erklärungen. Wie bereits erwähnt, unterstellen wir beim Zugang und Abgang jeweils eine Normalverteilung. Dabei wollen wir unter Zugrundelegung dieser Verteilungen Stichproben bilden, deren Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Wirklichkeit nahe kommt, d.h. vor allem die Zahlen um 1000 bzw. 200 müssen besonders häufig auftreten. Wir übernehmen nun, aus einer bei CHURCHMAN - ACKOFF - ARNOFF auszugsweise aufgeführten Tabelle, normalverteilte Zu-

1) Zur Problemdarstellung genügt jeweils ein Zeitraum von 5 Tagen. Die dafür notwendigen Zufallszahlen haben wir Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 373 entnommen.

		Abzutransportierende Einheiten		Transportierbare Einheiten		Kosten der Überstunden		Gesamtkosten
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Anzahl der Transport- einheiten	Tag	Tabellen- wert	Umgerechneter Wert $1000 + 100 (3) \cdot$ -morgestellte E.	Tabellen- wert	Umgerechneter wert $(1) \cdot 200 + 20 (5)$	Zu überstd.- satz zu trans- portierende Einheit $(4)-(6)$	$(7) \cdot \frac{(6)}{(1)-24}$ DM 10,-00	$(1) \times 200,-$ + (8)
5	1	2.455	1246	- 0.323	968	279	344	
	2	- 0.531	947	- 1.940	806	141	210	
	3	- 0.634	937	0.697	1070	-		
	4	- 1.279	1128	3.521	1352	-		
	5	0.046	1005	0.321	1032	-		
6	1	2.455	1246	- 0.323	1161	85	554 88	1554
	2	- 0.531	947	- 1.940	967	-		
	3	- 0.634	937	0.697	1284	-		
	4	1.279	1128	3.521	1623	-		
	5	0.046	1005	0.321	1239	-	88	1288
7	1	2.455	1246	- 0.323	1355	-		
	2	- 0.531	947	- 1.940	1128	-		
	3	- 0.634	937	0.697	1498	-		
	4	1.279	1128	3.521	1893	-		
	5	0.046	1005	0.321	1445	-	-	1400

* Die in Klammern stehenden Zahlen beziehen sich auf die jeweiligen Spalten.

fallszahlen der Rand-Corporation¹⁾ und tragen sie in Spalte (3) ein. Negative Zahlen bedeuten unter dem Durchschnitt liegende Werte; diese werden mit der Standardabweichung (100 bzw. 20) multipliziert und den Mittelwerten 1000 bzw. 100 zugerechnet. Der Überhang zwischen Zugang und Abgang ergibt sich in Spalte (7). Unter

1) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 173

der Annahme derselben Bedienungsrate werden die Kosten, der mittels Überstunden abzutransportierenden Einheiten, in Spalte (8) berechnet.

Die Gesamtkosten für 5 Tage¹⁾ aus der jeweiligen Transportmittellanzahl + Überstunden errechnen wir in Spalte (9). Dabei zeigt sich, daß die Bereitstellung von sechs Transportmitteln optimal ist.

In manchen Fällen ergibt die Analyse vorhandener Daten keine in mathematischen Formeln ausdrückbare Verteilung. Dann kann man eine Liste früherer Bedienungs- und Ankunftsdaten anlegen und die Eintragungen numerieren. Mit Hilfe einer Tabelle von Zufallszahlen läßt sich eine Stichprobe der Zugangs- und Abgangsraten erheben und in der gleichen Art wie im obigen Beispiel verwenden.

Mit dem oben angeführten Beispiel wollen wir nur eine der gewöhnlich doch recht zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten aufzeigen, die sich für die Warteschlangentheorie oder die Theorie der Stauungen auf den verschiedensten Gebieten ergibt. Überall dort, wo es im Betrieb zu Engpässen und damit zu Stauungen kommt, läßt sich mit ihrer Anwendung ein Überblick über die wirtschaftlichere Durchführung gewinnen. Allerdings darf nicht verschwiegen werden, daß das angewandte mathematische Instrumentarium außerordentlich kompliziert ist, so daß es bei der Problemuntersuchung gewöhnlich immer der Mithilfe eines Mathematikers bedarf.

So lange es gelingt, den zugrundeliegenden Vorgängen Kosten zuzuordnen, sind die meisten Probleme lösbar. Hier-

1) Die Größe der Stichprobe läßt sich auf ihre Signifikanz überprüfen.

in liegt aber auch die Grenze und Schwäche dieser Art von Planungsüberlegungen. Oft muß man sich mit Schätzungen behelfen. Trotzdem ist eine auf Schätzungen beruhende Rechnung der reinen Intuition vorzuziehen, so lange man sich der in der Rechnung enthaltenen Schwierigkeiten und Unsicherheiten bewußt bleibt.

E) Die Anwendung operationsanalytischer Verfahren bei der Bereitstellungsplanung der Glasfabrik

Nachdem wir schon im letzten Kapitel ein Problem der Bereitstellungsplanung angedeutet haben, wollen wir im folgenden mögliche Anwendungen für eine Bereitstellungsplanung in der Glasfabrik darstellen. Wir weisen dabei aber noch einmal auf die Interdependenz der drei Faktoren Programm-, Ablauf- und Bereitstellungsplanung hin, die wir bei all unseren aus systematischen Gründen erfolgenden Aufgliederungen nicht vergessen sollten.

I. Die Anwendung der Ersatztheorie bei der Bereitstellungsplanung der Betriebsmittel

Eine der Aufgaben¹⁾ der Bereitstellungsplanung der Betriebsmittel ist es, bei einem gegebenen Programm und einer bestimmten Kapazität die erforderlichen Ersatzinvestitionen optimal durchzuführen.

Dabei lassen sich bei nahezu jeder Industrieunternehmung die zwei Hauptgruppen von Ersatzproblemen aufzeigen, die durch die Ersatztheorie erfaßt worden sind.

1. Betriebsmittel mit langsam abnehmender Leistungsfähigkeit

Es handelt sich einmal um den Fall, daß ein Betriebsmittel durch den Gebrauch nach und nach seine Leistungsfähigkeit verliert. Es ist dann der Zeitpunkt der Erset-

1) Auf die Darstellung weiterer Aufgaben soll in diesem Zusammenhang verzichtet werden. Vgl. Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., 12. Aufl., S. 170 - 197. Im weiteren treten hier vor allem die Fragen einer optimalen Investitionspolitik auf, auf die aber nicht näher eingegangen werden soll.

zung so zu wählen, daß die Summe aus den Kosten der neuen sowie den Kosten für die Instandhaltung der alten Einrichtung und die durch den Ausfall verursachten Kosten minimiert werden.¹⁾ Ein solcher Ansatz läßt sich innerhalb der Glasfertigung mit Ausnahme des Wannenkompleses auf die meisten Betriebsmittel anwenden. Vor allem die Schneidvorrichtungen sowie die Transportmittel ("Schnecken", Kippwagen etc. ... Kraftfahrzeuge) erfüllen die Voraussetzungen.

Eine andere Frage ist, ob es immer gelingt, die für diese Berechnungen notwendigen Kostenwerte überhaupt bzw. mit vernünftigem Aufwand zu ermitteln. Diese Frage gilt aber grundsätzlich bei der Anwendung der Ersatztheorie und kann speziell nur am Einzelfall geklärt werden.

Ein Beispiel, das auch für die Anwendung auf Betriebsmittel der Glasfabrik möglich ist, kann folgendermaßen formuliert werden.²⁾

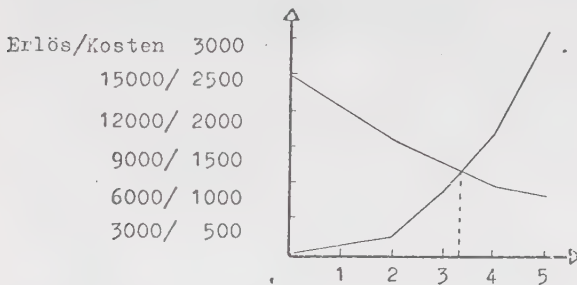
Die Glasfabrik besitzt eine Anzahl Betriebsmittel (z.B. Transportmittel), deren Anschaffung DM 15 000,-- pro Stück beträgt. Bei einem Weiterverkauf erzielt man nach zwei Jahren einen Preis von DM 10 000,--, nach vier Jahren DM 6 750,-- und nach fünf Jahren nur mehr DM 5 500,--.³⁾ (Nach fünf Jahren werden sie üblicherweise verkauft.) Die Instandhaltungskosten vergleichbarer Maschinen haben bisher, aus dem Durchschnitt jeder Alters-

-
- 1) Der Ansatz, den Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 442 - 447 angeben, unterstellt dabei monoton steigende Instandhaltungskosten.
 - 2) Das Beispiel entstammt Faure, R. - Boss, J.P. - Le Garff, A.: Grundkurs der Unternehmensforschung ..., a.a.O., S. 68/69
 - 3) Anstelle der verminderten Erlöse könnte man auch eine geschätzte Wertminderung in Form von technischem Verschleiß annehmen.

klasse berechnet, pro Betriebsmittel nach jedem Betriebsjahr betragen:

- bis zum Ende des 1. Jahres DM 320,-- (2-tes Jahr)
- bis zum Ende des 2. Jahres DM 855,-- (3-tes Jahr)
- bis zum Ende des 3. Jahres DM 1 740,-- (4-tes Jahr)
- bis zum Ende des 4. Jahres DM 3 190,-- (5-tes Jahr)

Die Frage lautet, ob es wirklich am günstigsten ist, die Betriebsmittel am Ende des 5. Jahres zu verkaufen.



Die abnehmende Erlösfunktion (Restwert) kann durch die Funktion $V(t) = A e^{-0,2t}$ angenähert werden. Die kumulierten Instandhaltungskosten durch $R(t) = R_0(e^{0,5t} - 1)$, wobei $R_0 = 500$ ist.¹⁾

Daraus ergeben sich die Gesamtkosten:

$$(1) \quad C(t) = A - A e^{-0,2t} + R_0 (e^{0,5t} - 1)$$

Die Durchschnittskosten pro Zeiteinheit betragen:

$$(2) \quad c(t) = \frac{C(t)}{t} = \frac{1}{t} A (1 - e^{-0,2t}) + R_0 (e^{0,5t} - 1)$$

1) t ist bei der Instandhaltungskostengleichung immer mit $t-1$ anzusetzen, da nur dadurch eine adäquate Zeitpunkt Betrachtung besteht.

Wir differenzieren und setzen die 1. Ableitung Null und erhalten folgenden Ausdruck:

$$(3) \quad \frac{A}{R_0} = \frac{1 - e^{0,5t} (1 - 0,5t)}{1 - e^{-0,2t} (1 + 0,2t)}$$

Aus diesem Ausdruck läßt sich mit Hilfe eines mathematischen Näherungsverfahrens (Regula Falsi) ¹⁾ mit 3,2 Jahren bestimmen. Es zeigt sich demnach, daß man mit dem Verkauf nicht bis zum Ende des 5-ten Jahres warten, sondern schon nach drei Jahren und drei Monaten verkaufen soll. Nach dieser Zeit betragen die jährlichen Durchschnittskosten DM 2820,--, während sie nach 5 Jahren DM 3010,-- ausmachen.

2. Betriebsmittel mit plötzlich auftretendem Ausfall

Im zweiten Fall handelt es sich um das Problem, daß Einrichtungen nach einer bestimmten Zeit völlig versagen. Die Aufgabe besteht nun darin, festzustellen, welche Stücke zu ersetzen sind und wie oft man sie ersetzen soll, um die Gesamtsumme der Kosten, die durch die Einrichtung selbst sowie durch den Ausfall und Ersatz entstehen, so niedrig wie möglich zu halten.

Diese Problemart läßt sich mit Hilfe des oft angeführten Glühlampenbeispiels ²⁾ darstellen. Auf spezielle Ausführungen soll hier aber verzichtet werden, da wir der Auffassung sind, daß sich für diesen Modelltyp bei der Bereitstellungsplanung der Glasfabrik keine speziellen Probleme ergeben. Die Durchführung und Anwendung auf allgemeinere Probleme (z.B. bei Glühlampen) halten wir

¹⁾ Für den praktischen Gebrauch hat man für die Lösung von Exponentialfunktionen einfache Rechentafeln entwickelt.

²⁾ Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 448 - 469

eben aus Effizienzgründen bei der Glasfertigung für problematisch. Der erzielbare Effekt steht unseres Erachtens in keinem Verhältnis zum dafür notwendigen Aufwand. Bei dem doch relativ begrenzten Umfang der auf diesen Sachkomplex anwendbaren Beispiele sehen wir daher keine Möglichkeit für eine realistische Anwendung in unserem Fall, obwohl wir die Allgemeingültigkeit der angewandten statistischen Verfahren nicht verkennen.

II. Die Bereitstellungsplanung der Arbeitskräfte mittels operationsanalytischer Verfahren

Probleme dieser Art sind im wesentlichen von Fertigungstyp oder Branche ziemlich unabhängig. Es handelt sich um kleinere Problemkomplexe mit abgegrenztem Interdependenz- und Wirkungsbereich und damit mit großer operationsanalytischer Anwendungsmöglichkeit. Sie sind in der Literatur als Darstellungsbispiele bestimmter Verfahren oder Theorien weit verbreitet und bedürfen von unserer Seite nur der zusammenfassenden Darstellung. Aus diesem Grund wollen wir auch auf eine ausführlichere und individuellere Beschreibung verzichten und nur unterschiedliche Modelltypen skizzieren, die bei der Bereitstellungsplanung der Arbeitskräfte in verschiedenen Situationen Verwendung finden können.

1. Die Planung der Besetzung von Ausgabeschaltern mit Hilfe der Warteschlangentheorie

Innerhalb der Fertigung jedes Betriebes kommt es immer wieder zu der Situation, daß sich Warteschlangen von Arbeitern vor Ausgabeschaltern bilden. Unter dem Gesichtspunkt der rationalen Produktionsgestaltung bedeutet dies einen Zeitverlust, der nach Möglichkeit durch Optimierung des Engpasses "Ausgabeschalter" vermieden werden soll.

Praktisch kann dieses Problem etwa in unserem Falle beim Materialausgabeschalter in der Zentralwerkstatt auftreten oder bei der Ausgabestelle für Ersatzschneidwerkzeuge, Schutzkleidung oder von sonstigem Ersatzmaterial. Aber auch die Frage, wieviel Wartungspersonal für immer wieder ausfallende Maschinen zu halten ist, damit das Verhältnis der dualen Schlangen - nämlich wartende Mechaniker und zu reparierende Maschinen - optimal wird, ist obigem Problem formal gleichzusetzen.¹⁾

Das eigentliche Problem der Warteschlangentheorie, das der Unregelmäßigkeit und Unkontrollierbarkeit der beiden die Schlange erzeugenden Prozesse, der Ankunft neuer "Kunden" (Arbeiter, ausfallende Maschinen) und ihre Abfertigung, ist gegenüber der kostenmäßigen Erfassung beider Prozesse von solch primärer Bedeutung, daß sich ein Großteil der Literatur nur mit diesem vielschichtigen Phänomen auseinandersetzt.²⁾ Dabei steht die Anwendung der Wahrscheinlichkeitstheorie im Mittelpunkt des Interesses. Läßt man sie außer acht, so könnte man zu dem Fehlschluß geführt werden, daß für die Schlangenlänge allein die durchschnittliche Ankunftsrate λ der Kunden und ihre durchschnittliche Abfertigungsrate μ verantwortlich sind. Hierbei bleibt aber die unregelmäßige Ankunft bzw. Abfertigung außer Betracht, so daß im Falle $\lambda \leq \mu$ nur bei gleichmäßigen Zeitabständen keine Schlange entsteht.³⁾ Insgesamt gilt, daß bei langdauernden Stauprozessen die Ankunftsrate immer kleiner sein muß als die Abfertigungsrate, d.h. die Kapazität der Bedienstungsstation darf nicht voll ausgelastet, es muß eine endliche durchschnittliche Leerzeit gestattet sein. Je

1) Vgl. auch das Beispiel der Transportmittelplanung

2) Vgl. hierzu unsere allgemeinen Ausführungen zur Warteschlangentheorie.

3) Vgl. Schneeweiss, H.: Zur Theorie der Warteschlangen. In: ZfhF 1960 (12), S. 471 - 507, hier S. 475

stärker die Ausnutzung der Abfertigungskapazität ist, um so länger ist die mittlere Warteschlange. Im Grenzbereich einer Vollauslastung kann es dabei zu überraschenden Ergebnissen kommen. So ist bei der Verkehrsdichte $x' = \frac{\lambda}{\mu} = 99\%$ ¹⁾ die Schlangenlänge $\bar{n} = 99$ und für $x' = 98\%$ nur noch 49, also weniger als die Hälfte des vorigen Wertes.²⁾ Berücksichtigt man, daß bei einer mittleren Schlangenlänge von $\bar{n}_s = 2$ pro absolute Zeitstunde zwei Arbeitsstunden durch Warten verloren gehen,³⁾ so erkennt man, wie wichtig hier Planungsüberlegungen sein können. Die Kosten, die hierbei von Interesse sind, setzen sich aus den Kosten für wartende "Kunden", den fixen Kosten zur Aufrechterhaltung der Bedienungsstation und den Kosten für die Leerzeiten der Bedienungsstation zusammen und sollen insgesamt ein Minimum ergeben.

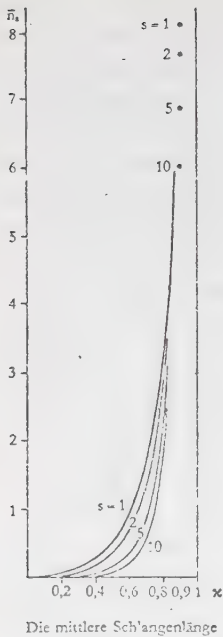
Eine weitere allgemein interessante Erkenntnis entsteht aus der Tatsache, daß bei derselben Kapazitätsausnutzung die Schlange um so kleiner wird, je mehr Abfertigungsstellen (-kanäle) ein System besitzt, ja, daß sie bei wachsender Anzahl der Abfertigungsstellen s gegen Null geht, obwohl sich auf der anderen Seite die durchschnittliche Leerlaufzeit jeder einzelnen Station nicht ändert. Hierfür findet sich die recht plausible Erklärung, daß ein System mit mehreren Abfertigungsstellen die Zufälligkeiten der Ankunft und Abfertigung besser ausgleichen kann. Die Größe des Effekts auf die mittlere Schlangenlänge gibt folgende Abbildung wieder:⁴⁾

1) Vgl. Schneeweiss, H.: a.a.O., S. 486

2) Vgl. Schneeweiss, H.: a.a.O., S. 486

3) Mit Ausschluß des gerade in Bedienung befindlichen Kunden.

4) Vgl. Schneeweiss, H.: a.a.O., S. 496



Bei einer Kapazitätsausnutzung von 90 % ergibt sich bei 5 getrennt arbeitenden Abfertigungsstellen (s) eine Gesamtschlängellänge von $\bar{n}_s = 5 \cdot 8,1 = 40,5$ Einheiten. Nach dem Zusammenlegen ist nach obiger Abbildung $\bar{n}_s = 6,8$. Die Schlängellänge und damit auch die verlorene Wartezeit wird etwa auf $1/6$ reduziert.¹⁾

Ein ausführliches Beispiel für die Berechnung der Besetzung von Ausgabeschaltern findet sich bei ANGERMANN.²⁾ Für die Bestimmung der optimalen Anzahl des Wartungspersonals beim Ausfall von Maschinen können wir auf das Beispiel von SCHNEEWEISS³⁾ verweisen. Einzelheiten finden sich auch noch bei CHURCHMAN, ACKOFF, ARNOFF⁴⁾ sowie in den meisten

allgemeinen Lehrbüchern.⁵⁾ Im übrigen gibt es eine Vielzahl beschriebener praktischer Fälle,⁶⁾ ja die Warte-

1) Vgl. Schneeweiss, H.: a.a.O., S. 497

2) Vgl. Angermann, Adolf: Industrielle ..., a.a.O., S. 245 - 250

3) Vgl. Schneeweiss, H.: a.a.O., S. 397/98

4) Vgl. Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 357 - 408. Besonderes Interesse verdient das Beispiel über Verkehrsstauungen (S. 379 ff.)

5) Vgl. Fletcher, A. - Clarke, G.: Mathematische Hilfsmittel ..., a.a.O., S. 138 - 159; Sasieni, M. - Yaspan, A. - Friedman, L.: Methoden ..., a.a.O., S. 134 - 163; Faure, R. - Boss, J.-P. - Le Garff, A.: a.a.O., S. 45 - 53

6) Vgl. etwa die Beschreibung eines Modells für die optimale Angestelltenanzahl für die Materialausgabe bei Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 243 - 251

schlangentheorie besteht nur aus einer Sammlung derselben, wenn man einmal von der allgemeinen Grundform absieht.

Das Ausmaß, in dem die Möglichkeiten der Warteschlangentheorie realisiert werden können, hängt im wesentlichen davon ab, inwieweit es gelingt, die wirklichen Ab- und Zugänge mathematisch zu erfassen. Zusätzlich zu diesen Erfordernissen muß es möglich sein, jeder der dualen Schlangen (wartende Kunden bzw. wartende Bedienstungen) Kosten zuzuordnen.

Die Entwicklung besserer Computer hat den lösungstechnischen Ablauf dieser komplexen Probleme weiter erleichtert. Wird ein Warteschlangenprozeß richtig "beschrieben" und werden die Kosten genau zugeordnet, so kann die Analyse der verschiedenen Warteschlangensituationen innerhalb einer Unternehmung positive Anwendungsmöglichkeiten ergeben.¹⁾ Allerdings ist die Anwendung von der Kenntnis und Handhabung eines mathematisch-statistischen Instrumentariums abhängig, das aufgrund seiner Komplexität mehr als die meisten anderen operationsanalytischen Methoden der Zusammenarbeit verschiedener Wissenschaftler bedarf. Bei jedem Einzelfall gelangen dabei unter Umständen andere Verfahren zur Anwendung, so daß die gesamte Warteschlangentheorie - abgesehen von der gleichen Grundstruktur - aus einer weiter steigenden Anzahl gesammelter Einzelfälle besteht. Die Notwendigkeit der Untersuchung aller Grunddaten dürfte auch für kleinere Probleme - auch innerhalb der Glasfertigung - für den praktischen Gebrauch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen auslösen, die in der Praxis eine nicht immer überschreitbare Grenze ergeben.

1) Vgl. Voorhis, van, W.R.: Waiting-Line Theory as a Management Tool. In: JORSA 1956 (4), S. 221 - 231, hier S. 231

2. Der optimale Einsatz von Arbeitskräften bei unterschiedlicher Qualifikation (assignment problem)

Es seien n Arbeiten oder Aufgaben gegeben, die erledigt werden sollen. Zu deren Verfügung stehen m Ausführende bzw. Möglichkeiten bereit. Dabei gilt $m = n$. Weiter sind Leistungs- bzw. Kostenzahlen gegeben, die darstellen, in welcher Weise jeder der Ausführenden für die einzelne Arbeit geeignet ist. Jedem der m Ausführenden soll eine der n Arbeiten in der Weise zugeordnet werden, daß die Summe der jeweiligen Leistungs- bzw. Kostendaten maximiert bzw. minimiert wird.

Eine solche Situation ist innerhalb der Glasfertigung in vielfältiger Weise gegeben. Betrachten wir nur den Fall, daß ein Meister drei oder mehr verschieden schwierige Arbeiten zu vergeben hat, für die die jeweiligen Arbeiter unterschiedliche Fähigkeiten mitbringen. Werden wir konkreter! Der Schneidhausleiter hat verschiedene Schneidaufträge (unterschiedliche Längen und Dicken, Qualitätsunterschiede) auf die Schneidvorrichtungen, die dafür verschieden gut geeignet sind, so zu verteilen, daß etwa die Gesamtbearbeitungszeit minimiert wird. Bei der unterschiedlichen Qualifikation der Schneidvorrichtungen müssen wir einmal objektive Qualifikationen unterscheiden, die sich daraus ergeben, daß einfach bestimmte Einrichtungen für bestimmte Zwecke besser geeignet sind. So ist ein Kreuzschneidstisch für den zweidimensionalen¹⁾ Schnitt besser geeignet, als etwa ein Drehschneidstisch oder ein einfacher Schneidstisch, bei dem die Glastafel durch Aufheben und Umdrehen erst in

1) Als zweidimensionalen Schnitt wollen wir den Vorgang bezeichnen, daß neben einem senkrechten Abnehmen der Borte, bzw. sonstigem Zuschnitt auch noch ein horizontaler Schnitt erfolgt, d.h. die Glastafel wird auf allen 4 Seiten beschnitten. Das schließt auch ein, daß aus einer großen Tafel mehrere kleine Scheiben herausgeschnitten werden.

die richtige Lage zum zweidimensionalen Schnitt gebracht werden muß. Zur objektiven Qualifikation kommt noch die subjektive Qualifikation des einzelnen Arbeiters, der die Schneidvorrichtung bedient. Auch er hat, bezogen auf die einzelne Vorrichtung, verschiedene Fähigkeiten und Erfahrungen. Für Planungszwecke lassen sich aber beide Qualifikationen in einem durchschnittlichen Leistungsgrad¹⁾ zusammenfassen.

Daraus kann dann die weiter unten angegebene Zeiten-Matrix ermittelt werden. Die einzelnen Angaben lassen sich als Bearbeitungszeit pro Einheit interpretieren; in unserem Falle etwa als Minuten pro Kiste zu schneidenden Glases. Die absoluten Zahlen spielen letztlich keine Rolle. Entscheidend ist nur die Problemdarstellung, weswegen wir ein einfaches Beispiel aus der Literatur übernehmen²⁾ und es auf die Verhältnisse der Glasfabrik übertragen.

a) Problemdarstellung

Nach den Zeitmessungen haben wir für die einzelnen Arbeiten auf den verschiedenen Schneidvorrichtungen folgende Matrix erhalten.

		Arbeiten				
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
Schneidvorrichtungen	A ₁	220	192	306	106	148
	A ₂	215	196	310	108	144
	A ₃	205	200	302	100	140
	A ₄	212	188	300	104	142
	A ₅	210	204	295	110	150
Spaltenminima		205	188	295	100	140

Matrix I

1) Fußnote siehe Seite 366

2) Fußnote siehe Seite 366

Die mathematische Problemformulierung lautet

$$(1) \quad \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} = \min$$

wobei c_{ij} den Wirkungsmaßstab der Schneidvorrichtung i im Hinblick auf die Arbeiten j darstellt.

Weiter gilt:

$$(2) \quad \begin{aligned} x_{ij(i)} &= 1 \\ x_{ij} &= 0 \end{aligned} \quad \text{für } j = j(i)^1),$$

was zum Ausdruck bringen soll, daß $x_{ij} = 1$ ist, wenn eine Zuordnung stattgefunden hat, ansonsten gleich Null, und daß in jeder Zeile und Spalte nur ein positiver Wert auftritt.²⁾

b) Problemlösung

Die Problemlösung obigen Modells ist mit Hilfe der FLOOD'schen Zurechnungstechnik möglich.³⁾ Es handelt sich wiederum um eine schrittweise Annäherung, wobei

1) Fußnote von Seite 365:

Der Leistungsgrad ergibt sich als durchschnittliche Leistungsmenge je Arbeitskraft oder Produktionsmittel (bzw. beide Komponenten zusammen betrachtet) pro Zeiteinheit (z.B. pro Std).

2) Fußnote von Seite 365:

Vgl. Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 152 - 155

1) Vgl. Kaufmann, A.: Méthodes et Modèles de la Recherche Opérationnelle (Les Mathématiques de l'Entreprise). Paris 1964, Tome II, S. 65

2) Das mathematische Problem stellt eine Variation des Transportproblems dar. Es ist das einfachste Problem des "Linear Programming".

3) Vgl. hierzu besonders die ausführliche Beschreibung bei Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: a.a.O., S. 314 - 333

aber die Rechenoperationen nicht gleichbleibend wiederholt werden.¹⁾

Als Ergebnis erhalten wir folgende Verteilung der einzelnen Arbeiten

	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	auf die
Schneidvorrichtungen	A ₃	A ₄	A ₅	A ₁	A ₂	

Dies ergibt einen Zeitaufwand von insgesamt

$$205 + 188 + 295 + 106 + 144 = 938 \text{ Min } ^2)$$

c) Kritische Würdigung

Die im obigen Ansatz gemachten Voraussetzungen befriedigen nicht ganz, weil in unserem speziellen Beispiel die Größe der Aufträge nicht berücksichtigt worden ist. Bei einer unterschiedlichen quantitativen Staffellung der einzelnen Aufträge braucht obige Lösung nicht mehr optimal zu sein. Die Überlegungen gelten nur, wenn wir unterstellen, daß alle Arbeiten bzw. Aufträge von den Arbeitern gleich lang ausgeübt werden. Gilt das nicht, so müssen wir einen anderen Ansatz - wie wir ihn schon in Kapitel D/II aufgezeigt haben - verwenden.

Trotzdem halten wir dieses einfachste Beispiel des "Linear Programming" für verschiedene Situationen innerhalb des Betriebes für praktisch anwendbar, weil es dem Planenden ein relativ leicht zu handhabendes Instrument zur Entscheidungsvorbereitung in die Hand gibt und ihn bei Anwendung dieses Verfahrens zwingt, seine Entscheidung mit quantitativen Daten zu fundieren, worin in vielen

1) Vgl. im einzelnen Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 152 - 158

2) Die angegebenen Zahlen sind an der Wirklichkeit der Glasfabrik orientiert.

Fällen allein schon ein Fortschritt zu sehen ist. Voraussetzung ist dabei allerdings, daß der Leistungsgrad im Hinblick auf die Erledigung jeder Arbeit in irgendeiner Weise quantitativ überhaupt faßbar ist, sei es in benötigten Stunden, in anfallenden Kosten oder in produzierten Gütern pro Zeiteinheit oder in sonstigen quantitativen Notationen. Ernstliche Schwierigkeiten bekommen wir bei rein schöpferischen Arbeiten, die sich im allgemeinen der quantitativen Erfassung entziehen.

III. Die Bereitstellungsplanung der Werkstoffe mittels operationsanalytischer Verfahren

Bei der Bereitstellungsplanung der Werkstoffe ergeben sich innerhalb der Glasfabrik zwei Anwendungsfälle. Einmal besteht unter Umständen die Möglichkeit, mittels Operations Research das optimale Mischungsverhältnis zu bestimmen. Dieses Modell kann aber nur angedeutet werden, da die Problemformulierung unsere physikalisch-chemischen Kenntnisse des Schmelzprozesses bei weitem übersteigt, zum anderen eine praktische Durchführung beim heutigen Stand der Glasforschung noch nicht gegeben ist. Es spielen bei der großtechnischen Tafelglasherstellung in bezug auf die Qualität so viele Einflußgrößen - die nicht einmal noch alle in ihrem Ausmaß bekannt sind - eine Rolle, daß es zur Zeit unmöglich erscheint, hiervon ein mathematisches Modell aufzubauen.¹⁾

¹⁾ Für die Eisenerzeugung ist es gelungen, ein im Problemansatz ähnliches Modell zu entwickeln und mit Linear Programming die optimale Möllerzusammensetzung zu errechnen. Vgl. Wartmann, R.: Rechnerische Erfassung der Vorgänge im Hochofen zur Planung und Steuerung der Betriebsweise sowie der Erzauswahl. In: Stahl und Eisen 1963 (83), H. 23, S. 1414 - 1425. Ähnliche Modelle sind in vielen Branchen, vor allem mit chemischer - unter Umständen auch mechanischer (Kraftfutter) - analytischer und syntnetischer Verarbeitung und voller Beherrschbarkeit der Mischungs-

Dagegen halten wir das sogenannte Verschnittproblem, das sich mit der optimalen Verteilung gegebener Aufträge auf bereitliegende Rohglastafeln bei Minimierung des Verschnitts befaßt, für eines der theoretisch und praktisch wichtigsten Probleme der Glasfabrik. Ihm wollen wir daher innerhalb dieses Kapitels unsere besondere Aufmerksamkeit schenken.

1. Überlegungen zum Mischungsproblem¹⁾

Die Senkung der Schmelzkosten²⁾ bei gleichzeitiger Verbesserung oder zumindest Beibehaltung der Glasqualität ist erklärtes Ziel aller Rationalisierungsbestrebungen innerhalb der Glasfertigung. Diese Aufgabe umfaßt vor allem Untersuchungen über das Mischungsverhältnis der verschiedenen Rohstoffe in ihren Beziehungen zu dem entsprechenden Energieverbrauch. Ist man bestrebt, aufgrund der geltenden Preise der Einsatzstoffe (Sand, Soda, Sulfat, Kalkstein, Dolomit, Scherben) ein optimales Gemenge zusammenzustellen, so scheint dies nicht allzu schwierig zu sein. Jeder Einsatzstoff bringt dazu eine bestimmte chemische Zusammensetzung mit, und es ist lediglich erforderlich, die Einsatzstoffe in ihren Mengen derart abzustimmen, daß das Glas in seiner Elementzusammensetzung

1) Fortsetzung von Seite 368:

bzw. Entwicklungsprozesse aufgestellt worden.

Vgl. Fabian, T.: A Linear Programming Model of Integrated Iron and Steel Production. In: Mgmt. Sci. 1958 (4), S. 415 - 449;

Kawaratani, T.K. - Ullman, R.J. - Dantzig, G.B.: Computing Tetraethyl - Lead Requirements in a Linear-Programming Format. In: JORSA 1960 (8), S. 24 - 29; Garvin, W.W. - Crandall, H.W. - John, J.B. - Spellman, R.A.: Application of Linear Programming in the Oil Industry. In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 407 - 430, hier besonders S. 416 - 421

1) Vgl. dazu die Überlegungen bei Wartmann, R.: a.a.O., S. 1414 - 1425

2) Gesamtkosten des Wannenkomplexes inklusive Gemengekosten.

(SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , Fe_2O_3 ...) ein gefordertes Verhältnis erreicht. Schreibt man noch jedem Einsatzstoff einen bestimmten Energieverbrauch zu, so läßt sich aus all den möglichen Kombinationen von Einsatzstoffen, die die Analysen- und Mengenbedingungen erfüllen, mit Hilfe des Linear Programming die preisgünstigste bzw. kostenminimale Kombination herausuchen.¹⁾ Voraussetzung ist, daß die jeweiligen Energieverbrauchsgrößen je Einsatzstoff bekannt sind. Diese sind abhängig von der chemischen Zusammensetzung des Einsatzstoffes, von der Gemengezusammensetzung insgesamt sowie von äußeren Bedingungen (Wind, Ofenzug, Außentemperatur). Dieser Zusammenhang wird durch die nachfolgenden Schemata deutlich gemacht. Abbildung links zeigt die Einwirkung des Verhältnisses von anteiligem CaO/MgO zu Na_2O (%) auf die notwendige Schmelztemperatur. Abbildung rechts gibt die Zeit wieder, die notwendig ist, bei einem bestimmten Verhältnis CaO/MgO zu Na_2O (%) Glas bei 1427°C gemengefrei zu halten.^{2) 3)} Schemata siehe Seite 371.

Damit erhebt sich also vor der Aufgabe der Bestimmung der günstigsten Gemengezusammensetzung eine sehr viel schwierigere, nämlich die, für ein gegebenes Gemenge alle erforderlichen wannentechnischen und chemischen Reaktionsgrößen zu erfassen und mit genügender Sicherheit

1) Vgl. etwa die Beispiele bei Dantzig, G.B.: Lineare Programmierung ..., a.a.O., S. 50 - 63; Charnes, A. - Cooper, W.W. - Mellon, B.: Blending Aviation Gasolines - A Study in Programming Interdependent Activities in an Integrated Oil Company. In: Econometrica 1952 (20), S. 135 - 159

2) Vgl. auch die Auswirkungen von verschiedenen chemischen Zusammensetzungen auf die Oberflächenspannung bei Salmang, H.: Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Glasfabrikation. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1957, S. 116

3) Die Schemata sind Salmang, H.: a.a.O., S. 93, entnommen.

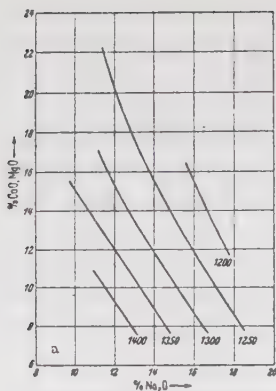


Abb. a: Erforderliche Temperatur, um Glas in 1 Stunde frei von Gemenge zu erschmelzen. (Nach Potts)

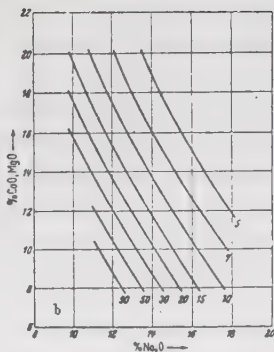


Abb. b: Erforderliche Zeit, um Glas bei 1427°C gemengefrei zu erhalten. (Nach Potts)

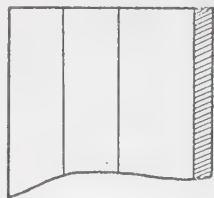
Quelle: Salmang, H.: Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Glasfabrikation. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1957, S. 93

planen zu können. Erst wenn es gelingt, ein mathematisches Modell der Glaswanne aufzustellen, das die wesentlichen Vorgänge beim Schmelzen erfasst, kann man die Auswirkungen einer bestimmten Wanne und Gemengezusammensetzung ermitteln und auf dieser Grundlage dann das optimale Gemenge auswählen. Dies erscheint aber nach dem heutigen Stand der Forschung noch nicht möglich.

2. Das eindimensionale Verschnittproblem

Beim Verschnittproblem unterscheiden wir zwei Unterprobleme: Das sogenannte eindimensionale Verschnittproblem tritt auf, wenn es bei praktischen unendlichen oder immer gleichen Längen nur auf die Zusammenstellung der Bestellbreiten ankommt. Dieses Problem kann auch für die

Glasfabrik interessant sein, wenn es darum geht, Aufträge gleicher Dicke, Länge und Qualität verschnittoptimal aus der Rohglastafel herauszuschneiden. Wir wollen daher zuerst einmal das eindimensionale Problem näher untersuchen und dann darauf aufbauend das zweidimensionale Verschnittproblem darstellen. Letzteres besteht darin, große rechteckige Tafeln in kleinere ebenfalls rechteckige Tafeln aufzuteilen. Dies ist für die Glasfabrik ein Hauptproblem, wenn wir unterstellen, daß wir immer nur Glas gleicher Art (Dicke, Qualität) zusammenfassend betrachten.¹⁾ Wie oben schon erwähnt, handelt es sich beim eindimensionalen Verschnittproblem in erster Linie um die Aufteilung von Rohglastafeln in schmalere Tafeln (Scheiben) mit vorgeschriebenen Breiten.²⁾



Verschnitt

-
- 1) Erörterungen über dieses Problem tauchen in der Literatur immer wieder auf. Vgl. dazu Paull, A.E.: Linear Programming: A Key to Optimum Newsprint Production. In: Pulp and Paper Magazine of Canada 1956 (57), S. 145 - 150;
Eiseman, K.: The Trim Problem. In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 279 - 284;
Förstner, K.: Die Aufstellung von Produktionsplänen bei der Papiererzeugung. In: Operations Research-Verfahren I. Hrsg. Henn, R., Meisenheim am Glan 1963, S. 73 - 92;
Gilmore, P.C. - Gomory, R.E.: A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem. In: JORSA 1961, (9), S. 849 - 859,
sowie die zusammenfassende Darstellung bei Sigg, A.: Das eindimensionale Verschnittproblem. IBM-Form 78 108 10.63, auf den wir im wesentlichen unsere Erörterungen stützen.
Außerdem Hox, G.: Erweiterte Anwendung von Linear Programming bei der Belegung von Papiermaschinen. In: Ablauf- und Planungsforschung 1964 (5), S. 26 - 33
- 2) Wir rechnen hier mit Tafeln ohne Borte.

Dabei entsteht, da die Aufteilung der vorliegenden Kundenaufträge gewöhnlich nicht genau passend erfolgen kann, ein Rest, der bis zu einer bestimmten Breite unverkäuflich ist. Dieser sogenannte Verschnitt geht zwar gewöhnlich wieder in die Produktion, aber er bedeutet eine Wertminderung, die zwar nicht ganz vermieden werden kann, die aber so weit als möglich verhindert werden soll.¹⁾ Ganz wird dies selbst mit rechnerischen Überlegungen nicht möglich sein, da die Auftragszusammensetzungen gewöhnlich zu willkürlich sind. Führt man ein solches Zusammensetzen von Auftragskombinationen durch probierendes Überlegen durch, so nimmt dies einmal sehr viel Zeit in Anspruch und es besteht keine Sicherheit, daß man auch das Verschnittminimum erreicht hat. Besser ist daher die Verwendung eines rechnerischen Ansatzes mit Hilfe von Linear Programming und eines Computers, wobei letzterer bei größeren Modellen aus Zeit- und Erfassungsgründen unbedingt erforderlich ist.

a) Problemdarstellung

An Hand eines stark vereinfachten Beispiels wollen wir das eindimensionale Verschnittproblem unter folgenden Annahmen darstellen:

Wir wollen aus Rohglastafeln mit 3000 mm Breite Aufträge über

250 Einheiten mit 900 mm

150 Einheiten mit 690 mm

120 Einheiten mit 385 mm Breite

so herausschneiden, daß der Verschnitt minimiert wird.²⁾

1) Zum Gemenge wird immer ein gewisser Anteil Scherben hinzugegeben.

2) In Wirklichkeit werden mit dem FOURCAULT-Verfahren keine so breiten Rohglastafeln gezogen (bis 2,70 m); dazu bedarf es eines anderen Verfahrens (PITTSBURGH-Verfahren bis 3,35 m). Die auftragsgegebenen Breiten streuen gewöhnlich nicht so sehr, wie im angenommenen

Wir erfassen alle möglichen Schnittkombinationen in einer Matrix:

3000	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
900	3	2	2	1	1	1	1					
690		1		3	2	1		4	3	2	1	
385		1	3		1	3	5		2	4	6	7
	300	125	45	30	335	255	175	240	160	80	0	305

In der ersten Spalte versuchen wir, die größte Breite so oft als möglich aus der Rohglastafel herauszuschneiden. Der Rest aus 3 · 900 zur Tafelbreite von 3000 ist 300, der kleiner ist als die kleinste geforderte Breite. In Spalte 2 wird die Zahl 3 um 1 erniedrigt. Im Rest von 1200 kann die nächst niedrige Breite von 690 einmal und die kleinste Breite ebenfalls einmal untergebracht werden, wobei ein Rest von 125 verbleibt. Auf diese Art und Weise erhalten wir alle möglichen Schnittkombinationen mit den dazugehörigen Schnittresten, die jeweils in der letzten Zeile der Spalten angeführt sind. Aus all diesen Kombinationen wollen wir nun diejenigen auswählen, die die geforderten Mengenbedingungen erfüllen und deren Gesamtverschnitt möglichst minimal sein soll.

Um diese Frage beantworten zu können, ordnen wir den einzelnen Matrixelementen $x_1, x_2 \dots x_{12}$ zu und erhalten ein Gleichungssystem, das alle möglichen Schnittkombinationen enthält unter der Bedingung der gegebenen Auftragszahlen.

2) Fortsetzung von Seite 373:

Beispiel. Die Breitenunterschiede betragen, abhängig von der jeweiligen Dicke, beginnend mit 40 cm jeweils 4 cm bzw. ab 80 cm 8 cm. Eine realistische Annahme macht aber den Ansatz für eine "Hand"rechnung aufgrund der vielen Kombinationsmöglichkeiten zu umfangreich, so daß wir uns auf eine vereinfachte Problemdarstellung beschränken müssen.

Der Auftrag von 250 Einheiten "Breite 300" läßt sich aus den folgender Kombinationen wählen. Dies gilt analog auch für die anderen Aufträge und wir erhalten:

$$3x_1 + 2x_2 + 2x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7 = 250$$

$$x_2 + 3x_4 + 2x_5 + x_6 + 4x_8 + 3x_9 + 2x_{10} + x_{11} = 150$$

$$x_2 + 3x_3 + x_5 + 3x_6 + 5x_7 + 2x_9 + 4x_{10} + 6x_{11} + 7x_{12} = 120$$

Alle nichtnegativen Zahlenzusammenstellungen $x_1, x_2 \dots x_{12}$, die das obige Gleichungssystem erfüllen, bilden offenbar ein mögliches Programm. Den Bewertungsmaßstab liefert der sich für die einzelnen Kombinationen ergebende Verschnitt, der minimiert werden soll.¹⁾

$$300x_1 + 125x_2 + 45x_3 + 30x_4 + 335x_5 + 255x_6 + 175x_7 + 240x_8 + 160x_9 + 80x_{10} + 0x_{11} + 305x_{12} \rightarrow \text{Min.}$$

Damit ist das Problem auf ein Standardproblem des "Linear Programming" zurückgeführt, das uns schon einige Male beschäftigt hat und das mit der Simplexmethode lösbar ist.

b) Problemlösung

Das dargestellte Problem entspricht nun aber nicht der geforderten Normalform, da eine Minimierung der Zielfunktion angestrebt wird. Wir machen uns dabei die sogenannte Dualität aller Linear-Programming-Aufgaben zunutze, die besagt, daß zu jedem primalen System ein dua-

1) Als Bewertungskriterium lassen sich auch die Verschnittkosten heranziehen, mit dem Vorteil, daß auch Stillstandskosten und wenn nötig Lagerkosten berücksichtigt werden können. Diese Überlegungen können zu einem "Schneidhaus-Produktionsmodell" zusammengefaßt werden, das etwa von Förstner für eine Papierfabrik schon dargelegt worden ist. Vgl. Förstner, K.: Die Aufstellung ..., a.a.O., S. 73 - 92

les System gehört. Für unser Beispiel bedeutet dies, daß unsere Minimalaufgabe durch eine duale Maximalaufgabe darstellbar ist und dann - da in der Normalform existierend - mit der Simplexmethode ohne weiteres lösbar ist. Für die duale Berechnung ergeben sich einige Unterschiede, auf die wir im Verlauf der Berechnung noch besonders verweisen werden.

Unser primales System hat folgendes Aussehen:

3000		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}		
900	v_1	3	2	2	1	1	1	1						250	
690	v_2			1	3	2	1		4	3	2	1		150	
385	v_3			1	3		1	3	5		2	4	6	7	120
		300	125	45	30	335	255	175	240	160	80	0	305	Min.	

Wir vertauschen jetzt die Rolle der Zeilen und der Spalten und erhalten die duale Maximalaufgabe von der Form:¹⁾

	v_1	v_2	v_3	
x_1	3			300
x_2	2	1	1	125
x_3	2		3	45
x_4	1	3		30
x_5	1	2	1	335
x_6	1	1	3	255
x_7	1		5	175
x_8		4		240
x_9		3	2	160
x_{10}		2	4	80
x_{11}		1	(6)	0 ←
x_{12}			7	305
	250	150	120	0

Tab. 1

1) Fußnote siehe Seite 377

Anders als bei der primalen Aufgabe beginnen wir hier bei der Suche des Pivots (Tab. 1) mit dem kleinsten Element der letzten Spalte - Kennzeichnung der Schlüsselzeile - und bestimmen die Schlüsselspalte als kleinsten Quotienten von Elementen der letzten Zeile mit den entsprechenden Elementen der Schlüsselzeile. In unserem Fall ergibt sich als Pivot das Element $x_{11}v_3$. Die weiteren Rechenoperationen zur Gewinnung der Lösung erfolgen, wie sie in der Beschreibung der Simplexmethode in unserem "Exkurs" näher dargestellt worden sind. Das Ergebnis zeigt sich im Gegensatz zur primalen Aufgabe mit negativem Vorzeichen in der letzten Zeile.

Die Lösung unseres Beispiels erhalten wir aus folgenden Matrices:

	v_1	v_2	x_{11}	
x_1	3			300
x_2	2	5/6	-1/6	125
x_3	2	-3/6	-1/2	45
x_4	1	(3)		30 ←
x_5	1	11/6	-1/6	335
x_6	1	1/2	-1/2	255
x_7	1	-5/6	-5/6	175
x_8		4		240
x_9		8/3	-1/3	160
x_{10}		4/3	-2/3	80
v_3		1/6	1/6	0
x_{12}			-7/6	305
	250	130	-20	0

Tab. 2

1) Fußnote von Seite 376:

Über die Dualität vgl. Beckmann, M.J.: Lineare Planungsrechnung ..., a.a.O., S. 33 - 36;

Krekó, B.: Lehrbuch ..., a.a.O., S. 63 - 69 und S. 198 - 202

sowie unsere Ausführungen im Exkurs (Teil 2/D/II). Eine Definition der Dualität findet sich bei Angermann, A.: Industrielle ..., a.a.O., S. 207; vgl. ebenfalls Vazsonyi, A.: a.a.O., S. 141 - 147

	v_1	x_4	x_{11}	
x_1	3			300
x_2	$31/18$	$-5/18$	$-1/6$	$116 \frac{2}{3}$
x_3	$\textcircled{13/6}$	$+1/6$	$-1/2$	50 ←
v_2	$1/3$	$1/3$	0	10
x_5	$7/18$	$-11/18$	$-1/6$	$316 \frac{2}{3}$
x_6	$5/6$	$-1/6$	$-1/2$	250
x_7	$23/18$	$+5/18$	$-5/6$	$183 \frac{1}{3}$
x_8	$-4/3$	$-4/3$	0	200
x_9	$-8/9$	$-8/9$	$-1/3$	$133 \frac{1}{3}$
x_{10}	$-4/9$	$-4/9$	$-2/3$	$66 \frac{2}{3}$
v_3	$-1/18$	$-1/18$	$1/6$	$-1 \frac{2}{3}$
x_{12}	0	0	$-7/6$	305
	$206 \frac{2}{3}$	$-43 \frac{1}{3}$	-20	-1300
	↑			

Tab. 3

	x_3	x_3	x_{11}	
x_1	$-18/13$	$-3/13$	$\textcircled{9/13}$	$3000/13$ ←
x_2	$-31/39$	$-16/39$	$+3/13$	$6000/13$
v_1	$6/13$	$1/13$	$-3/13$	$300/13$
v_2	$-2/13$	$4/13$	$1/13$	$30/13$
x_5	$-7/39$	$-25/39$	$-1/13$	$400/13$
x_6	$-5/13$	$-3/13$	$-4/13$	$3200/13$
x_7	$-23/39$	$+7/39$	$-7/13$	$2000/13$
x_8	$8/13$	$-16/13$	$-4/13$	$3000/13$
x_9	$16/39$	$-32/39$	$-7/13$	$2000/13$
x_{10}	$8/39$	$-16/39$	$-10/13$	$1000/13$
v_3	$1/39$	$-2/39$	$2/13$	$-5/13$
x_{12}	0	0	$-7/6$	305
	$-\frac{1240}{13}$	$-\frac{770}{13}$	$+\frac{360}{13}$	$-\frac{78900}{13}$
		↑		

Tab. 4

	x_3	x_4	x_1	
x_{11}	-2	-1/3	13/9	$\frac{1000}{3}$
x_2	-1/3	-1/3	-1/3	5000/13
v_1			+1/3	1300/13
v_2		1/3	-1/9	-70/3
x_5	-1/3	-2/3	1/9	2200/39
x_6	-1	-1/3	4/9	13600/39
x_7	-5/3		7/9	7000/39
x_8		-4/3	4/9	16000/39
x_9	-2/3	-1	7/9	7000/39
x_{10}	-4/3	-2/13	10/9	13000/39
v_3	1/3		-2/9	-2000/39
x_{12}	-7/3	-7/18	+91/54	-755/9
	-40	-50	-40	-15300

Tab. 5

Das Ergebnis aus Tab. 5 lautet:

$x_1 = 40$; $x_3 = 40$; $x_4 = 50$. Verschnitt = 15 300 mm².

Zur Erfüllung der geforderten Aufträge wählen wir aus der vorher aufgestellten Kombinationstabelle folgenden Schnittplan: Man schneide aus 40 Rohglastafeln jeweils drei Tafeln Breite 900, dazu aus 40 Tafeln jeweils zweimal Breite 900 und dreimal Breite 385 und aus 50 Rohglastafeln jeweils einmal Breite 900 und dreimal Breite 690. Insgesamt ergibt dies die geforderten Auftragsmengen von

250 Einheiten Breite 900
150 Einheiten Breite 690 und
120 Einheiten Breite 385

bei einem minimalen Verschnitt¹⁾ von insgesamt 15 300 mm².

1) Es existiert noch eine Lösung mit gleich großem Verschnitt. Es handelt sich um $x_2 = 120$; $x_4 = 10$.

Bei der optimalen Lösung ist erstaunlich, daß die Kombination mit dem absolut geringsten Verschnitt (x_{11}) nicht in der Gesamtlösung enthalten ist. Es zeigt sich damit, daß, bedingt durch die Auftragszusammensetzung, der minimale Gesamtverschnitt ohne die Kombination x_{11} gegeben ist. Bei einer intuitiven Bearbeitung wird man ungern auf Kombination x_{11} verzichten, da sie ja - ohne Berücksichtigung der Auftragsmengen - das absolut beste Schnittergebnis liefert. Ohne mathematischen Ansatz und Berechnung fehlt uns beim "probierenden Kombinieren" eben das Kriterium, das uns sagt, ob wir wirklich insgesamt die bestmögliche Lösung erreicht haben. Dabei handelt es sich beim dargestellten Fall noch um ein recht einfaches und übersichtliches Beispiel, das wohl den Problemerkern, nicht aber die Vielzahl der Möglichkeiten der betrieblichen Wirklichkeit wiedergibt. Die Anwendung eines absolut richtigen Instruments auf die intuitiv nicht überschaubaren Auftragskombinationen bei der Glasfabrik kann zu bedeutenden Kostenersparnissen führen, selbst wenn man berücksichtigt, daß sich der rechnerisch ermittelte Verschnitt durch produktionsbedingte Gegebenheiten (Bruch, Glasfehler) noch erhöht.

c) Der allgemeine Ansatz des eindimensionalen Verschnittproblems

Bevor wir uns einigen Komplikationen und Erweiterungen des eindimensionalen Verschnittproblems zuwenden, wollen wir das eben Gesagte in einem allgemeinen mathematischen Ansatz kurz wiederholen. Dabei soll sein:

f_0 = Roh- oder Nutzbreite

f_i = Auftragsbreiten, so geordnet, daß $f_i > f_{i+1}$ ($i=1 \dots m$)

d_i = Auftragsmengen ($i=1, \dots, m$)

Als Schnittkombination j wird eine Zusammenstellung ganzer, nichtnegativer Zahlen $a_{1j}, a_{2j} \dots a_{mj}$, für die gilt

$$\sum_{i=1}^m f_i a_{ij} \leq f_0 \quad \text{gesucht.}$$

Der Verschnitt ergibt sich aus

$$c_j = f_0 - \sum_{i=1}^m f_i a_{ij}.$$

Alle möglichen Schnittkombinationen finden sich in der Matrix

$$A = (A_1, A_2 \dots A_j \dots A_n) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mj} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Die Zusammenstellung aller Kombinationsbreiten

$x_1, x_2 \dots x_n$ zeigt der Zeilenvektor

$$X = (x_1, x_2 \dots x_n).$$

Die Auftragsmengen bilden den Spaltenvektor

$$D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_m \end{bmatrix}$$

und den Verschnitt der Zeilenvektor

$$C = (c_1, c_2 \dots c_n).$$

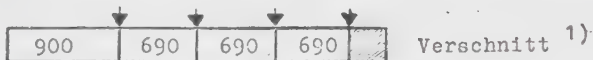
Zusammengefaßt ergibt sich:

$$\begin{aligned} \min z &= CX \\ AX &= D \\ X &\geq 0 \end{aligned}$$

d) **Komplikationen und Erweiterungen des eindimensionalen
Verschnittproblems**

aa) **Beschränkung der Anzahl der Schneidevorrichtungen**

Bei unserem angeführten Beispiel haben wir gesehen, daß es theoretisch möglich gewesen ist, aus der Rohglastafel 7 Streifen zu je 385 mm Breite zu schneiden. Nun kann es aber in der Praxis so sein, daß die Schneidevorrichtung am Streifenschneidtisch z.B. nur 4 Einzelschneidmesser besitzt.



Das bedeutet, daß wir Kombinationen, die mehr als 4 Einzelschneider beanspruchen, nicht bearbeiten können. Natürlich wäre eine Umstellung der Schneidkluppen möglich, um dann in einem zweiten Arbeitsgang, wenn erforderlich, eine größere Zahl als 4 Streifen zu erhalten. Dies soll aus Kostenerwägungen verboten sein. Die Lösung dieser technischen Beschränkung in unserem mathematischen Ansatz ist dadurch gegeben, daß wir Kombinationen von mehr als 4 Streifen überhaupt nicht in unsere Kombinationsmatrix aufnehmen.

Auch andere technologische Komplikationen, die aus irgendwelchen Gründen bestimmte Kombinationen nicht zulassen, werden dadurch behoben, daß diese Kombinationen von vornherein nicht in die Kombinationsmatrix und damit ins Gleichungssystem aufgenommen oder nachträglich ausgeschlossen werden.

Bei umfangreichen Kombinationstabellen ermöglicht das Ausscheiden der Kombinationen mit den größten Verschnitt-

1) Hierbei wird unterstellt, daß das Abnehmen der Borte schon erfolgt ist bzw. zwei weitere, dafür notwendige Schneidkluppen vorhanden sind.

ten eine lösungstechnische Vereinfachung, die bei manueller Bearbeitung unter Umständen anzuwenden ist, auch wenn man sich der Gefahr aussetzt, daß das absolute Optimum damit nicht erreicht wird.

bb) Das Vorhandensein mehrerer Rohbreiten¹⁾

Bei der Glasfabrik kommt es immer wieder vor, daß zur Erfüllung gegebener Aufträge Rohglastafeln verschiedener

1) Hier läßt sich die Verbindung zur optimalen Belegung der Ziehmaschinen herstellen, wo wir, von gegebenen Aufträgen ausgehend, bei den einzelnen Ziehbreiten unterschiedliche Produktivitäten auch aufgrund möglicher Verschnittkombinationen unterstellt haben. Eine Berücksichtigung der in der Planperiode zur Verfügung stehenden Kapazität erscheint in Form von Bedingungsgleichungen möglich, die die praktische Erfahrung wiedergeben, daß die Ziehgeschwindigkeit gleicher Glasdicken bei Überschreiten der Normalbreite (2,00 m) abnimmt. Für drei Rohbreiten ergibt sich folgende zusammengesetzte Kombinationsmatrix:

$$\begin{array}{cccccccccccc}
 x_1^0 & x_2^0 & \dots & x_n^0 & x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 \\
 \hline
 A_1 & a_{11}^0 & a_{12}^0 & \dots & a_{1n}^0 & a_{11}^1 & a_{12}^1 & \dots & a_{1n}^1 & a_{11}^2 & a_{12}^2 & \dots & a_{1n}^2 = d_1 \\
 A_2 & a_{21}^0 & a_{22}^0 & \dots & a_{2n}^0 & a_{21}^1 & a_{22}^1 & \dots & a_{2n}^1 & a_{21}^2 & a_{22}^2 & \dots & a_{2n}^2 = d_2 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\
 A_m & a_{m1}^0 & a_{m2}^0 & \dots & a_{mn}^0 & a_{m1}^1 & a_{m2}^1 & \dots & a_{mn}^1 & a_{m1}^2 & a_{m2}^2 & \dots & a_{mn}^2 = d_m \\
 \hline
 c_1^0 + c_2^0 + \dots + c_n^0 + c_1^1 + c_2^1 + \dots + c_n^1 + c_1^2 + c_2^2 + \dots + c_n^2 \rightarrow \text{Min}
 \end{array}$$

Die Berücksichtigung der vorhandenen Kapazität erfolgt durch die Bedingungsgleichungen:

$$\begin{array}{ccccccc}
 b_{11}^0 & b_{12}^0 & \dots & b_{1n}^0 & & & +y_1 = k_1 \\
 & & & & b_{11}^1 & b_{12}^1 & \dots & b_{1n}^1 & & & +y_2 = k_2 \\
 & & & & & & & & b_{11}^2 & b_{12}^2 & \dots & b_{1n}^2 & +y_3 = k_3
 \end{array}$$

wobei gilt: $b_{11}^0 = b_{12}^0 = \dots = b_{1n}^0$
 $b_{11}^1 = b_{12}^1 = \dots = b_{1n}^1$ und $b_{ij}^0 < b_{ij}^1 < b_{ij}^2$
 $b_{11}^2 = b_{12}^2 = \dots = b_{1n}^2$

Fortsetzung siehe Seite 384

Breite zur Verfügung stehen, da bei der Erzeugung unterschiedlich breite Ziehmaschinen Verwendung finden. Die Berücksichtigung dieses Umstandes erfolgt dadurch, daß man nebeneinander die verschiedenen Schnittkombinationen der einzelnen Rohbreiten $f_o^1, f_o^2 \dots f_o^p$ in einer Matrix, nach den vorher geschilderten Grundsätzen bildet. Dies impliziert aber, daß alle Rohbreiten in beliebiger Menge zur Verfügung stehen. Ist dies nicht der Fall, so können wir dies in Form von Bedingungsgleichungen berücksichtigen (siehe obige Fußnote).

- (1) Es kann sein, daß wir aus Kostengründen oder technischen Gründen bestimmte Rohbreiten bevorzugt verarbeiten wollen. Um dies zu erreichen, multiplizieren wir die aus den einzelnen Rohbreiten anfallenden Verschnitte mit unterschiedlichen Faktoren, die die verschiedenen Kosten zum Ausdruck bringen sollen. Somit werden bestimmte Rohbreiten bei der Optimierung besonders begünstigt.¹⁾
- (2) Will man die Rohbreiten in einem bestimmten Verhältnis verarbeiten, so kann man dies in Form zusätzlicher Gleichungen berücksichtigen. Möchte man z.B. zwei Rohbreiten im Verhältnis 1 : 2 verwenden, so läßt sich folgende Bedingung einführen:

$$\sum_{j=1}^{n_1} x_j^1 - 2 \sum_{j=1}^{n_2} x_j^2 = 0,$$

wobei x_j^1 bzw. x_j^2 die den Kombinationen aus der

1) Fortsetzung von Seite 383:

Vgl. einen ähnlichen Ansatz für eine Papierfabrik bei Förstner, K.: Die Aufstellung ..., a.a.O., S. 73 - 92. Er bezieht bei seinem Modell auch noch andere Überlegungen (Lagerhaltung, Stillstand) mit ein.

1) Eine absolute mengenmäßige Berücksichtigung der Rohbreiten ist nicht möglich.

Rohbreite f_0^1 bzw. f_0^2 zugeordneten Variablen
sind.¹⁾

cc) Die Einführung oberer und unterer Auftragsgrenzen

Der Ansatz in unserem dargelegten Beispiel verlangt die genaue Einhaltung der Auftragsmengen. Nun ist es aber bei der Glasfabrik so, daß gängige Breiten auch eingelagert werden. Dies bringt die Möglichkeit mit sich, daß durch eine Einführung von Mindest- bzw. Höchstgrenzen bessere Kombinationen wahrgenommen werden können, als das bei Einhaltung der genauen Auftragsmengen möglich ist. Allerdings darf man dabei nicht in das Extrem verfallen, daß durch die Aufhebung der Auftragsmengenangaben nur Kombinationen mit relativ geringem Verschnitt verwendet werden, was dann zur übergroßen Lagerbildung führen kann. Die Lagerung von Glas ist aber aus technischen Gründen nur beschränkt möglich und mit erheblichen Zusatzkosten verbunden. Die eben angeführte "Scheinlösung" kann damit vermieden werden, daß anstelle der

Gleichung $AX = D$ das

Ungleichungspaar $AX \geq D_1$

$AX \leq D_2$ angesetzt wird, wobei

gilt $D_1 \leq D_2$.

Die Angabe von Höchstmengen ($AX \leq D_2$) ist deshalb notwendig, weil die Auftragsbreiten nicht über ein bestimmtes Maß hinaus übererfüllt werden sollen, da die Lagerkosten bzw. das Absatzrisiko dann den "Erfolg" der besseren Kombinationsmöglichkeiten ausgleichen können. Die Festlegung dieser Höchstmengen kann nach Erfahrungssätzen erfolgen.

1) Unterstellt man, daß das Schneiden auf zwei Schneidautomaten stattfindet, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten arbeiten, so läßt sich die Bedingung einer synchronen Fertigstellung ebenfalls in den Modellsatz aufnehmen. Vgl. Eisemann, K.: a.a.O., S. 280 - 282

Die Anwendung des modifizierten Ansatzes bringt allerdings einen erheblich vergrößerten Rechenaufwand mit sich, der bei den Gesamtüberlegungen in Erwägung gezogen werden muß.

e) Rechnerische Schwierigkeiten und kritische Würdigung

Grundsätzlich ist die Lösung des allgemeinen Ansatzes des eindimensionalen Verschnittproblems mittels der Simplexmethode immer möglich. Grenzen für die praktische Verwirklichung ergeben sich dabei allein durch die Dimension des Problems, d.h. durch die Zahl der Auftragsbreiten (Zahl der Gleichungen) und die Zahl der Variablen (Schnittkombinationen). Dabei ist die Zahl der Gleichungen insoweit beherrschbar, als sie davon abhängt, wieviel Aufträge wir für eine Planungsperiode zusammenfassen. Eine Vielzahl von Aufträgen (Auftragsbreiten) ermöglicht es uns aber andererseits erst, die Vorteile des mathematischen Ansatzes gegenüber der intuitiven Handhabung auszunützen.

Die Zahl der Variablen (Schnittkombinationen) ist im allgemeinen um so größer, je kleiner die Auftragsbreiten im Vergleich zur Rohbreite sind. Natürlich hat auch die Zahl der Auftragsbreiten insgesamt einen Einfluß auf die Anzahl der Schnittkombinationen. Für eine praktische Handhabung ist nun aber entscheidend, daß keine übergroße Zahl von Schnittkombinationen auftritt, da

- (1) der interne Speicher jedes Computers beschränkt ist,
- (2) die Verwendung externer Speicher die Rechenzeit verlängert und unrentabel macht.¹⁾

Andererseits liegt aber gerade - wie schon einmal angedeutet - in der Vielzahl der möglichen Kombinationen ei-

1) Hierbei ergeben sich Unterschiede bei Band- und Plattenspeichern.

ne Gewähr für die Optimalität des Ansatzes des Verschnittproblems.

Für den praktischen Gebrauch wird es nun unabwendbar sein, daß wir eine gewisse Auswahl aus der Gesamtmenge aller Kombinationsmöglichkeiten treffen. Wir akzeptieren nur solche Schnittkombinationen, deren Verschnitt ein gewisses Mindestmaß (Verschnitt-Toleranz) nicht überschreitet. Es gilt dann:

$$c_j \leq t,$$

wobei t (Verschnitt-Toleranz) kleiner als die kleinste Auftragsbreite angenommen wird. In unserem Beispiel ist z.B. $t \approx 385$ angesetzt worden. Zur Eliminierung einiger Schnittkombinationen nehmen wir t mit einem kleineren Wert an, wobei er allerdings auch wieder nicht zu klein sein soll, da sonst die Gefahr einer Suboptimierung gegeben ist. Außerdem sollte man auf gewisse Kombinationen, nämlich solche, die nur ein Element ungleich 0 besitzen, nicht verzichten, auch wenn die Verschnitt-Toleranz überschritten wird. Praktische Versuche haben gezeigt, daß die Verwendung von Toleranzen gegenüber der Anwendung "ungesiebter" Matrices - mit erheblich größerer Rechenzeit - in den meisten Fällen keinen größeren Nachteil mit sich bringt, so daß der vereinfachte Ansatz durchaus gerechtfertigt ist.

Die Berücksichtigung der Glasfehler beim Schneiden bzw. der Bruch erhöht zwar den theoretisch ermittelten Verschnitt, braucht aber keine grundsätzliche Änderung der durch den Schnittplan festgelegten Strategie mit sich bringen. Ist eine Rohglastafel infolge Glasfehler nicht voll ausnutzbar, so versucht man nach den Grundsätzen zur Erstellung der Schnittkombination zu verfahren.¹⁾

1) D.h. es soll unter Berücksichtigung der Glasfehler, von der größten Tafel-Auftragsgröße ausgehend, eine Kombination mit dem kleinsten Verschnitt herausgeschnitten werden.

Die Abgleichung auf die im Schnittplan geforderten Mengen kann dann am Schluß durch kombinierendes Überlegen des relativ kleinen und übersichtlichen Verschnittproblems vom einzelnen Schneider selbst durchgeführt werden.

Der Vorteil des sich im Schnittplan ergebenden mathematischen Ansatzes gegenüber der bisher üblichen Methode¹⁾ wird nicht durch die Beachtung von Glasfehlern aufgehoben, sondern der sich ergebende absolute Verschnitt wird nur vergrößert, während der (relative) Vorteil der Berücksichtigung der Gesamtaufträge und ihrer optimalen Aufteilung nicht von Glasfehlern beeinflusbar ist.

Zur Anwendung des eben geschilderten eindimensionalen Verschnittproblems bedarf es einer Zusammenfassung aller Kundenaufträge gleicher Länge und Dicke zu einem Betriebsauftrag, der dann mit dem errechneten Schnittplan verschnittminimal verplant werden kann. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Auftragslängen im Betriebsauftrag - das Merkmal gleicher Glasdicke muß auch hier erfüllt sein - geschieht durch die Formulierung des sogenannten zweidimensionalen Verschnittproblems.

3. Das zweidimensionale Verschnittproblem

Beim zweidimensionalen Verschnittproblem erfolgt neben der Kombination der Breiten auch noch eine Kombination

1) Bei der derzeitigen praktischen Durchführung wird ein Auftrag eines Glasgroßhändlers unter Nichtbeachtung der Gesamtoptimierung auf die einzelnen Schneider bzw. Schneidvorrichtungen verteilt, die dann die Unteraufträge - die nicht unter dem Gesichtspunkt der Gesamtoptimierung vergeben worden sind - optimal unter Berücksichtigung der Glasfehler zu bearbeiten versuchen. Die gewiß vorhandene große Kombinationserfahrung der Schneider wird nicht voll ausgenutzt, da die willkürlich vergebenen Unteraufträge keine Gesamtoptimierung durch Addition der Suboptima zulassen.

der Längen, um aus großen Rohglastafeln kleinere Scheiben mit unterschiedlichen Maßen und Mengen verschnittminimal herauszuschneiden. Die angegebene Lösung stellt keine exakte Minimierung im strengen mathematischen Sinn dar, bringt aber gegenüber der intuitiv manuellen Methode erhebliche Verbesserungen.¹⁾

Wir erhalten die Lösung, indem wir jeder Breitenkombination eine Längenkombination zuordnen und dann erst die Minimierung durchführen. Im mathematisch-formalen Ansatz bevorzugen wir schon vom Aufbau her die duale Formulierung.

Die Problemstellung lautet dann: Aus einer Anzahl Rohglastafeln mit den Abmessungen $B \cdot L$ sollen kleinere Scheiben mit den Abmessungen $b_1 \cdot l_1, \dots, b_n \cdot l_n$ unter Berücksichtigung der Auftragsmengen $m_1 \dots m_n$ verschnittoptimal herausgeschnitten werden. Dabei möge die Lage der kleineren Platten mit b_i parallel B und l_i parallel L sein.

An gegebenen Daten wollen wir annehmen:

$$\begin{array}{llll} B \cdot L & = & 100 \cdot 300 & \\ b_1 \cdot l_1 & = & 40 \cdot 30 & m_1 = 350 \text{ Stück} \\ b_2 \cdot l_2 & = & 35 \cdot 40 & m_2 = 500 \text{ Stück} \\ b_3 \cdot l_3 & = & 30 \cdot 50 & m_3 = 252 \text{ Stück} \end{array}$$

a) Erstellung der Breitenkombinationen

Wie beim eindimensionalen Problem beginnen wir, die Breitenkombinationstabelle nach dem dort geschilderten

1) Bei unseren Überlegungen können wir uns für den zweidimensionalen Fall, neben Hinweisen, nur auf die detaillierteren Ausführungen von Maak, H.: Gedanken zum zweidimensionalen Verschnittproblem. IBM-Form 78109.11.63 stützen, an die wir uns weitgehend anlehnen.

Verfahren aufzustellen. Dabei gilt die Ungleichung

$$B - b_n < \sum_{i=1}^n r_i^{(k)} \cdot b_i \leq B. \quad (1)$$

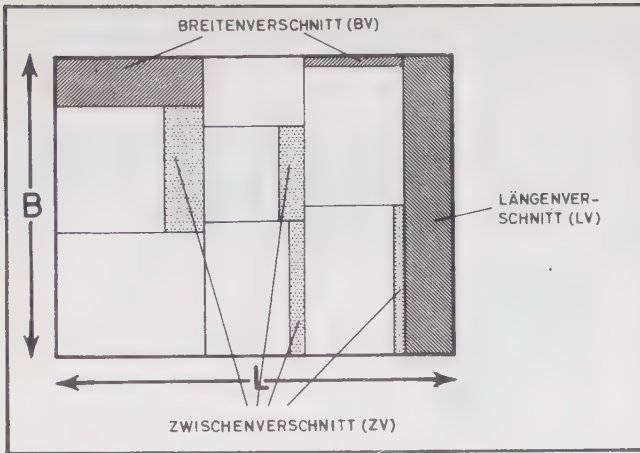
Die linke Hälfte der Ungleichung besagt, daß der Verschnitt nicht breiter sein kann als die kleinste Bestellbreite, wobei unterstellt wird, daß die Breiten $b_1 \dots b_n$ der Größe nach sortiert sind. Der mittlere Teil beschränkt die Kombination der Breiten b_i auf die Gesamtbreite B , wobei die Häufigkeiten $r_i^{(k)}$ ganze positive Zahlen sein sollen und der obere Index (k) die Nummer der Breitenkombination wiedergibt. Den anfallenden Verschnitt bezeichnen wir als Breitenverschnitt und erhalten folgende Kombinationstabelle:

	b_1	b_2	b_3	Breitenverschnitt
1	2			20
2	1	1		25
3	1		2	0
4		2	1	0
5		1	2	5
6			3	10

Neben dem Breitenverschnitt unterscheiden wir noch Zwischen- und Längenverschnitt, deren Lage sich nachfolgender Abbildung entnehmen läßt. (Abbildung siehe Seite 391)

b) Zuordnung einer Länge zu jeder Breitenkombination

Es kommt nun darauf an, jeder Breitenkombination eine Länge $L^{(k)}$ zuzuordnen. Dabei wird es nicht immer möglich sein, ein $L^{(k)}$ so zu bestimmen, daß an seinem Ende ein glatter Schnitt entsteht, da nur in Ausnahmefällen (z.B. Breitenkombination 1) die b_i so geschaffen sind, daß sie ein gemeinsames Vielfaches bzw. gleiche Länge b_i innerhalb der Länge $L^{(k)}$ haben.



Das bedingt, daß die $L^{(k)}$ nicht lückenlos aufeinander folgen, und neben der Breitenkombination ein Zwischenverschnitt entsteht. Für die zweite Breitenkombination¹⁾ unseres Beispiels entsteht dann für $L^{(40)}$ folgendes Bild:

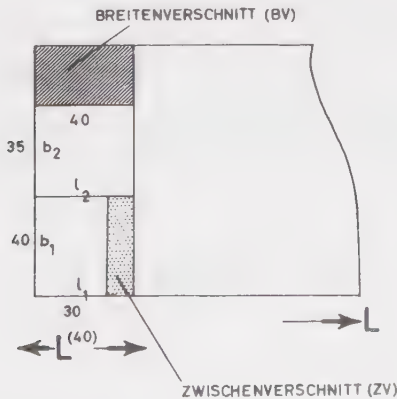


Abb. 1

1) Die erste Breitenkombination ist problemlos, da die l_i gleich sind.

Wir suchen nun ein Vielfaches bzw. eine Kombination der beiden Längen l_1 und l_2 mit minimalem Zwischenverschnitt zu finden.

Die Größe des Breitenverschnitts bleibt innerhalb der gleichen Breitenkombination prozentual gleich. Wir legen nun die kürzere der beiden Längen l_1 noch einmal hinein und erhalten $2l_1$ und folgendes Schaubild:

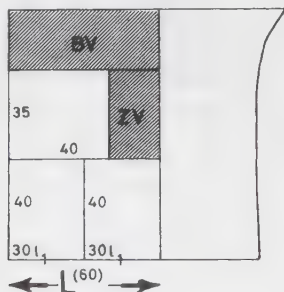


Abb. 2

Hat beim ersten Schritt der Längenkombination der Verschnitt aus Breitenverschnitt (BV) und Zwischenverschnitt (ZV)

$$BV = 40 \cdot 25 = 1000$$

$$ZV = 10 \cdot 40 = 400 \text{ bezogen auf die geschnittene Teilfläche } L^{(40)}$$

$$40 \cdot 100 = 4000 \quad 35 \% \text{ betragen, so beträgt er bei der zweiten Kombination } L^{(60)}$$

$$BV = 60 \cdot 25 = 1500$$

$$ZV = 20 \cdot 35 = 700$$

$$\text{bezogen auf die geschnittene Teilfläche von } L^{(60)}$$

$$60 \cdot 100 = 6000$$

$$\frac{1600}{6000} \cdot 100 = 36,6 \%$$

Die Länge $L^{(40)}$ wäre also der $L^{(60)}$ vorzuziehen. Das günstigste Verhältnis ergibt sich zweifellos bei $L^{(120)}$,

da dort der Zwischenverschnitt $ZV = 0$ und nur der Breitenverschnitt zu berücksichtigen ist. Das Verschnittverhältnis beträgt

$$\frac{120 \cdot 25 \cdot 100}{120 \cdot 100} = 25 \%$$

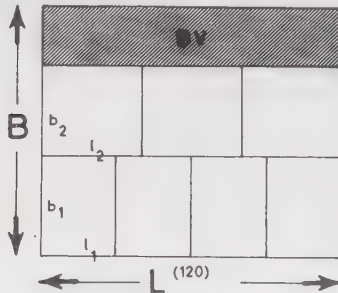


Abb. 3

Wir erhalten eine Plattenhäufigkeit von 4 b_1 und 3 b_2 . Mathematisch läßt sich der Vorgang folgendermaßen darstellen. Es soll ein $L^{(k)}$ so bestimmt werden, daß

$$B \cdot L^{(k)} - \sum_{i=1}^n r_i^{(k)} \cdot b_i \cdot u_i^{(k)} \cdot l_i \rightarrow \text{Min.} \quad (2)$$

wobei gilt

$$u_i \cdot l_i \leq L \quad (3)$$

Ein etwas anderes Vorgehen ergibt sich, wenn wir nur die maximale Differenz der Länge $u_i l_i$ der einzelnen Breitenkombinationen betrachten.

Für unser Beispiel bedeutet das:

$$\begin{aligned} 1_1 &= 30; & 1_2 &= 40; & \Delta l &= 10 \\ 2l_1 &= 60; & 1_2 &= 40; & \Delta l &= 20 \\ 2l_1 &= 60; & 2l_2 &= 80; & \Delta l &= 20 \\ 3l_1 &= 90; & 2l_2 &= 80; & \Delta l &= 10 \\ 3l_1 &= 90; & 3l_2 &= 120; & \Delta l &= 30 \\ 4l_1 &= 120; & 3l_2 &= 120; & \Delta l &= 0 \end{aligned}$$

Es zeigt sich, daß L bei 4 l_1 und 3 l_2 am kleinsten ist; damit würde man hier das gleiche $L^{(k)}$ wählen wie bei der Einbeziehung des Breitenverschnitts (Methode Flächenminimierung). Dies muß aber nicht immer so sein. Bei mehr als zwei Breitenkombinationen (Beispiel: $B = 200$; $2b_1 = 60$; $b_2 = 50$; $b_3 = 30$) gilt die maximale Differenz, d.h. zwischen größtem und kleinstem $u_i \cdot l_i$.

Mathematisch ausgedrückt sucht man:

$$\max_{i \geq j} \left\{ |u_i^{(k)} \cdot l_i - u_j^{(k)} l_j| \right\} \Rightarrow \min \quad (2a)$$

$$\text{wobei die Länge: } L^{(k)} = \max \{ u_i l_i \} \quad (5)$$

und $u_i \cdot l_i \leq L$ (3) gilt.

Während Gleichung 2 (Methode der Flächenminimierung) im allgemeinen etwas geringere Teilverschnitte ergibt als mit Gleichung (2a) und damit zunächst die bessere Lösung erreicht wird, hat die Methode der Differenzminimierung (Gleichung 2a) den Vorteil, zu kleineren Längen $L^{(k)}$ zu führen und dadurch bessere Längenkombinationen zu ermöglichen.

Bei der Zuordnung einer günstigen Länge $L^{(k)}$ zu den einzelnen Breitenkombinationen erhalten wir nach der Differenzminimierungsmethode folgendes Ergebnis:

Komb. Nr.	(1) b_1	(2) b_2	(3) b_3	(4) $L^{(k)}$	(5) Reihenfolge nach Größe von $L^{(k)}$	(6) (7) (8) Plattenhäufigkeit			(9) BV + ZV
						1	2	3	
1	2			30	6	2			600
2	1	1		120	4	4	3		3000
3	1		2	150	3	5		6	0
4		2	1	200	1		10	4	0
5		1	2	200	2		5	8	1000
6			3	50	5			3	400

Tab. A

c) Die Erstellung der Längenkombination

Wie wir für die Breiten eine Kombinationstabelle errechnet haben, beginnen wir nun, eine Längenkombinationstabelle aufzustellen. Wir ordnen die erhaltenen $L^{(k)}$ der Längenzuordnung der einzelnen Breitenkombinationen der Größe nach und teilen die Länge L der Rohglastafel auf diese $L^{(k)}$ nach den schon früher entwickelten Kombinationsgrundsätzen auf. D.h. wir bestimmen Zahlen $h^{(k)}$ so, daß gilt

$$L - L^{(k)} / \sum_k h^{(k)} L^{(k)} \leq L \quad (6)$$

wobei $h^{(k)} \geq 0$ und ganzzahlig sein soll.

Zu jeder auf diesem Wege gefundenen Längenkombinationen gehört nun wieder ein Längenverschnitt (LV) und in Verbindung mit dem, jeden $L^{(k)}$ zugeordneten Breiten- und Zwischenverschnitten, läßt sich jeder Längerkombination ein Gesamtverschnitt zuordnen, der auch das Kriterium für die Zielfunktion der einzelnen Längenkombinationen darstellt.

Wir erhalten folgende Kombinationstabelle:

Komb. Nr.	L ⁽¹⁾	L ⁽²⁾	L ⁽³⁾	L ⁽⁴⁾	L ⁽⁵⁾	L ⁽⁶⁾	Platten- häufigkeit			Gesamtver- schnitt
	200	200	150	120	50	30	1	2	3	
1	1				2		-	10	10	1000
2	1				1	1	2	10	7	3100
3	1					3	6	10	4	2800
4		1			2		-	10	14	2000
5		1			1	1	2	5	11	4100
6		1				3	6	5	8	3800
7			2				10	-	12	-
8			1	1		1	11	3	6	3600
9			1		3		5	-	15	1500
10			1		2	1	7	-	12	3600
11			1		1	3	11		9	3300
12			1			5	15		6	3000
13				2	1		8	6	3	7500
14				2		2	12	6		7200
15				1	3	1	6	3	9	5100
16				1	2	2	8	3	6	7200
17				1	1	4	12	3	3	6900
18				1		6	16	3		6600
19					6				18	3000
20					5	1	2		15	5100
21					4	3	6		12	4800
22					3	5	10		9	4500
23					2	6	12		6	6600
24					1	8	16		3	6300
25						10	20			6000

Tab. B

Aus der Längenkombinationstabelle läßt sich in Verbindung mit Tab. A Spalten 6 -9 des vorherigen Abschnittes die Plattenhäufigkeit und der Gesamtverschnitt bestimmen. Diese Angaben über die Plattenhäufigkeit und den

Gesamtverschnitt bilden das Ausgangsmaterial für die Verschnittminimierung, unter Berücksichtigung der geforderten Aufträge, mit der Simplexmethode. Die Minimierung des Gesamtverschnitts als Zielfunktion ergibt sich aus:

$$\text{alle } \sum \left\{ B \cdot L - \sum_k \sum_{i=1}^n r_i^{(k)} \cdot u_i^{(k)} \cdot l_i \right\} \Rightarrow \text{Min} \quad (7)$$

Platten

Dabei steht unter der Doppelsumme in der geschweiften Klammer die durch die kleinen Scheiben belegte Fläche.

d) Problemlösung mit Hilfe der Simplexmethode

Die Angaben in Tab. B bezüglich der Plattenhäufigkeit und des Gesamtverschnitts lassen sich gemäß den Überlegungen beim eindimensionalen Verschnittproblem als ein Gleichungssystem unter Einbeziehung der Auftragsmengen betrachten. Es gilt dann

$$\begin{array}{rcll} 2x_2 + 6x_3 + 5x_5 + \dots & 16x_{24} + 20x_{25} & = & 350 \\ 10x_1 + 10x_2 + 10x_3 + 10x_4 + 5x_5 + \dots + 3x_{17} & & = & 500 \\ 10x_1 + 7x_2 + 4x_3 + 14x_4 + 11x_5 \dots & + 6x_{23} + 3x_{24} & = & 252 \\ Z: 1000x_1 + 3100x_2 + 2800x_3 \dots & 6300x_{24} + 6000x_{25} & \Rightarrow & \text{Min} \end{array}$$

Als dualer Ansatz ergibt sich:

$$\begin{array}{rcll} & 10x_1 + & 10x_1 & = 1000 \\ 2x_2 + & 10x_2 + & 7x_2 & = 3100 \\ 6x_3 + & 10x_3 + & 4x_3 & = 2800 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \\ 16x_{24} + & & 3x_{24} & = 6300 \\ 20x_{25} & & & = 6000 \\ 350v_1 + 500v_2 + 252v_3 & \Rightarrow & & \text{Max} \end{array}$$

Tab. 1

woraus sich zur Problemlösung folgende Matrices entwickeln.

	v_1	v_2	v_3	
x_1	-	10	10	1000
x_2	2	10	7	3100
x_3	6	10	4	2800
x_4	-	10	14	2000
x_5	2	5	11	4100
x_6	6	5	8	3800
x_7	10	-	(12)	0 ←
x_8	11	3	6	3600
x_9	5	-	15	1500
x_{10}	7	-	12	3600
x_{11}	11	-	9	3300
x_{12}	15	-	6	3000
x_{13}	8	6	3	7500
x_{14}	12	6	-	7200
x_{15}	6	3	9	5100
x_{16}	8	3	6	7200
x_{17}	12	3	3	6900
x_{18}	16	3	-	6600
x_{19}	-	-	18	3000
x_{20}	2	-	15	5100
x_{21}	6	-	12	4800
x_{22}	10	-	9	4500
x_{23}	12	-	6	6600
x_{24}	16	-	3	6300
x_{25}	20	-	-	6000
	350	500	252	0
			↑	

Tab. 2

	v_1	v_2	x_7	
x_1	$-50/6$	10	$-5/6$	1000 ←
x_2	$-23/6$	10	$-7/12$	3100
x_3	$8/3$	10	$-1/3$	2800
x_4	$-70/6$	10	$-7/6$	2000
x_5	$-43/6$	5	$-11/12$	4100
x_6	$-4/6$	5	$-2/3$	3800
v_3	$5/6$	$-$	$1/12$	0
x_8	6	3	$-1/2$	3600
x_9	$-15/2$		$-5/4$	1500
x_{10}	-3		-1	3600
x_{11}	$7/2$		$-3/4$	3300
x_{12}	10		$-1/2$	3000
x_{13}	$11/2$	6	$-1/4$	7500
x_{14}	12	6	$-$	7200
x_{15}	$-3/2$	3	$-3/4$	5100
x_{16}	$+3$	3	$-1/2$	7200
x_{17}	$+19/2$	3	$-1/4$	6900
x_{18}	16	3	$-$	6600
x_{19}	-15		$-3/2$	3000
x_{20}	$-21/2$		$-5/4$	5100
x_{21}	-4		-1	4800
x_{22}	$+5/2$		$-3/4$	4500
x_{23}	$+7$		$-1/2$	6600
x_{24}	$+27/2$		$-1/4$	6300
x_{25}	$+20$		$-$	6000
	140	500	-21	0

↑

Tab. 3

	v_1	x_1	x_7	
v_2	- 5/6	1/10	- 1/12	100
x_2	9/2	- 1	+ 1/4	2100
x_3	11	- 1	<u>1/2</u>	1800 ←
x_4	-10/3	- 1	- 1/3	1000
x_5	- 3	- 1/2	- 1/2	3600
x_6	7/2	- 1/2	- 1/4	3300
v_3	5/6		1/12	0
x_8	17/2	- 3/10	- 1/4	3300
x_9	-15/2		- 5/4	1500
x_{10}	- 3		- 1	3600
x_{11}	7/2		- 3/4	3300
x_{12}	10		- 1/2	3000
x_{13}	16/2	- 3/5	1/4	6900
x_{14}	17	- 3/5	1/2	6600
x_{15}	1	- 3/10	- 1/2	4800
x_{16}	11/2	- 3/10	- 1/4	6900
x_{17}	12	- 3/10	0	6600
x_{18}	37/2		1/4	6300
x_{19}	- 15		- 3/2	3000
x_{20}	-21/2		- 5/4	5100
x_{21}	- 4		- 1	4800
x_{22}	+ 5/2		- 3/4	4500
x_{23}	+ 7		- 1/2	6600
x_{24}	+27/2		- 1/4	6300
x_{25}	+ 20		-	6000
	$\frac{3340}{6}$	- 50	+ $\frac{62}{3}$	- 50000
			↑	

Tab. 4

	v_1	x_1	x_3	
v_2	1	- 1/15	1/6	400
x_2	- 1	- 1/2	- 1/2	1200
x_7	(22)	- 2	2	3600 ←
x_4	4	- 5/3	+ 2/3	2200 ¹⁾
x_5	8	- 3/2	1	5400
x_6	9	- 1	1/2	4200
v_3	- 1	- 1/6	- 1/6	- 300
x_8	14	- 4/5	1/2	4200
x_9	20	- 5/4	5/2	6000
x_{10}	19	- 2	2	7200
x_{11}	20	- 3/2	3/2	6000
x_{12}	21	- 1	1	4800
x_{13}	5/2	- 1/10	- 1/2	6000
x_{14}	6	2/5	- 1	4800
x_{15}	12	13/10	+ 1	6600
x_{16}	11	- 4/5	+ 1/2	7800
x_{17}	12	- 3/10	-	6600
x_{18}	13	+ 1/2	- 1/2	5200
x_{19}	18	- 3	+ 3	8400
x_{20}	17	- 5/2	5/2	9600
x_{21}	17	- 2	2	8400
x_{22}	19	- 3/2	3/2	7200
x_{23}	18	- 1	1	8400
x_{24}	19	- 1/2	1/2	7200
x_{25}	20	-	0	6000
	+ 102 ↑	- $\frac{26}{3}$	- $\frac{124}{3}$	- 124.400

Tab. 5

1) Der kleinere Quotient ergibt sich bei x_7

	x_7	x_1	x_3	
v_2	- 1/22	+ 4/165	5/66	3200/11
x_2	+ 1/22	-13/22	- 9/22	15000/11
v_1	1/22	- 1/11	1/11	1800/11
x_4	- 2/11	-43/11	10/33	17000/11
x_5	- 4/11	-17/22	3/11	45000/11
x_6	- 9/22	- 2/11	- 7/22	30000/11
v_3	+ 1/22	-17/66	- 5/66	- 1500/11
x_8	- 7/11	26/55	-17/22	21000/11
x_9	-10/11	35/44	15/22	30000/11
x_{10}	-19/22	- 3/11	3/11	54000/11
x_{11}	-10/11	7/11	- 7/22	30000/11
x_{12}	-21/22	10/11	-10/11	15000/11
x_{13}	- 5/44	7/55	8/11	61500/11
x_{14}	- 3/11	52/55	-17/11	42000/11
x_{15}	- 6/11	263/110	- 1/11	51000/11
x_{16}	-11/22	1/5	- 1/2	6000
x_{17}	- 6/11	87/110	-12/11	51000/11
x_{18}	-13/22	37/22	-37/22	33800/11
x_{19}	- 9/11	-15/11	15/11	60000/11
x_{20}	-17/22	12/11	21/22	75000/11
x_{21}	-17/22	- 5/11	5/11	61800/11
x_{22}	-19/22	5/22	5/22	45000/11
x_{23}	- 9/11	7/11	- 7/11	60000/11
x_{24}	-19/22	27/22	-27/11	45000/11
x_{25}	-10/11	<u>20/11</u>	-20/11	30000/11 ←
	- $\frac{51}{11}$	+ $\frac{20}{33}$	- $\frac{1670}{33}$	$\frac{155200}{11}$
		↑		

Tab. 6

x_7

x_{25}

x_3

v_2

x_2

v_1

x_4

x_5

x_6

v_3

x_8

x_9

x_{10}

x_{11}

x_{12}

x_{13}

x_{14}

x_{15}

x_{16}

x_{17}

x_{18}

x_{19}

x_{20}

x_{21}

x_{22}

x_{23}

x_{24}

x_1

- 1/2

11/20

- 1

1500

-13/3

- 1/3

- 50

142000

Tab. 7a

x_7

x_{12}

x_3

v_2

x_2

v_1

x_4

x_5

x_6

v_3

x_8

x_9

x_{10}

x_{11}

x_1

-21/10

11/10

- 1

15000

x_{13}

x_{14}

x_{15}

x_{16}

x_{17}

x_{18}

x_{19}

x_{20}

x_{21}

x_{22}

x_{23}

x_{24}

x_{25}

- 4

- 2/3

- 50

142000

Alternativtableau 7 b

Als Ergebnis erhalten wir aus Tab. 7 a

$$\text{Lösung 1: } x_7 = \frac{13}{3} \begin{pmatrix} 10 \\ 0 \\ 12 \end{pmatrix}; x_{25} = 1/3 \begin{pmatrix} 20 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; x_3 = 50 \begin{pmatrix} 6 \\ 10 \\ 4 \end{pmatrix}; v = 142\,000$$

und aus Tab. 7 b ein dieser gleichzusetzendes Ergebnis.

$$\text{Lösung 2: } x_7 = 4; x_{12} = 2/3; x_3 = 50; v = 142\,000$$

Die Tab. 7a und 7b sind nicht mehr vollständig errechnet worden, da sich das Ergebnis schon aus den wenigen dargestellten Zeilen ergibt.

Bezüglich der Ganzzanligkeit der Ergebnisse schlugen wir eine Aufrundung nach oben vor. Es gibt zwar ein Verfahren - das sogenannte "Ganzzahlige Optimieren"¹⁾ - das die Ganzzanligkeit der Lösung garantiert, doch ist dieses Verfahren bei größeren Problemen relativ unhandlich; in unserem Falle erscheint eine Aufrundung ohne weiteres möglich.²⁾ Überhaupt können wir uns bei der Glasfabrik nicht darauf beschränken, nur die für den optimalen Verschnitt notwendige Anzahl von Rohglas tafeln bereitzustellen, sondern wir müssen bei der Berechnung einen bestimmten Ausfall durch Bruch und Glasfehler berücksichtigen, der sich durch die beste Verschnittoptimierung nicht verhindern läßt und in der mangelnden Beherrschbarkeit der Glasverarbeitung bzw. -produktion begründet liegt. Was durch die Verschnittoptimierung beim ein- oder zweidimensionalen Verschnittproblem erreicht wird, ist eine Reduzierung des im sogenannten Kombinationsverschnitt begründeten Abfalls, der durch die exakte mathematische Formulierung auf das durch Betriebs- und Auftragsgegebenheiten erreichbare Minimum reduziert wird.

1) Vgl. dazu unsere Ausführungen im theoretischen Teil.

2) Aus der Sicht der Ganzzanligkeit ist Lösung 2 vorzuziehen, da nur eine Aufrundung notwendig ist.

Der Glasbruch und die Notwendigkeit der Änderung der Schnittlinien im Einzelfall wegen des Auftretens von Glasfehlern lassen den wirklichen Verschnitt über den theoretisch errechneten Verschnitt hinaus ansteigen.

Durch die Vorgabe der optimalen Kombination im Hinblick auf die Gesamtaufträge wird der - bei den bisher üblichen, zum Teil schlecht kombinierbaren Kleinaufträgen - besonders große Kombinationsverschnitt auf das mathematische Minimum beschränkt und wird den Gesamtverschnitt nicht unbeträchtlich senken.

Aus unseren formalen Lösungen lassen sich im Rückschluß folgende graphische Aufteilungen der Rohglastafel herausfinden.

Die Längenkombination $3(x_3)$ ergibt eine Plattenhäufigkeit von 6 Scheiben Auftrag 1 (A_1), 10 Scheiben (A_2) und 4 Scheiben (A_3) pro Rohglastafel. Die Aufteilung läßt sich ohne weiteres aus Tab. B und Tab. A errechnen. Ein erfahrener Schneider kann dabei durch das räumliche Verschieben des Längen- und Breitenverschnitts noch manche Glasfehler abdecken.

$$x_3 = 50; A_1 = 6; A_2 = 10; A_3 = 4; L_{200}^{(1)} = 1;$$

$$L_{30}^{(6)} = 3; b_2^{(1)} = 2; b_3^{(1)} = 1; b_1^{(6)} = 2.$$

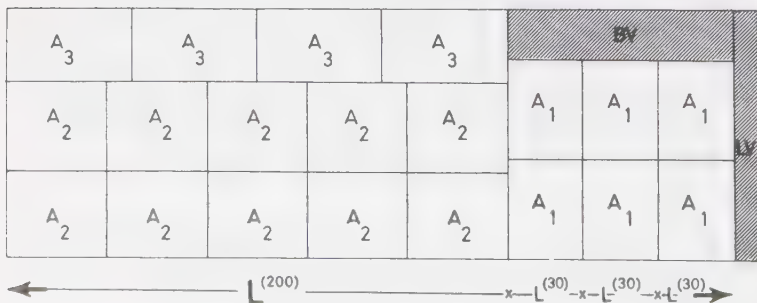


Abb. 4

Längenkombination 7: $(x_7) = 5$ (aufgerundet)

$$A_1 = 10; A_3 = 12; L_{150}^{(3)} = 2; b_1^{(3)} = 1; b_3^{(3)} = 2;$$

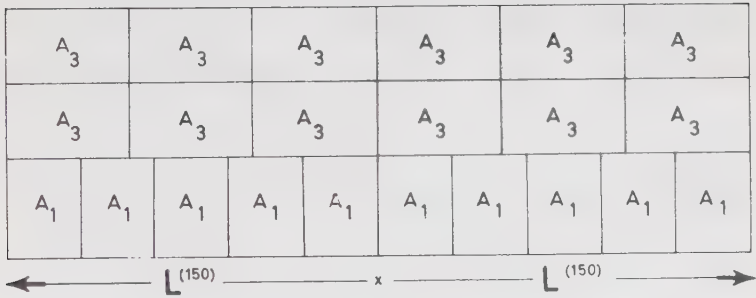


Abb. 5

Längenkombination 25: $x_{25} = 1$ (aufgerundet)

$$A_1 = 20; L_{30}^{(6)} = 10; b_1^{(6)} = 2;$$

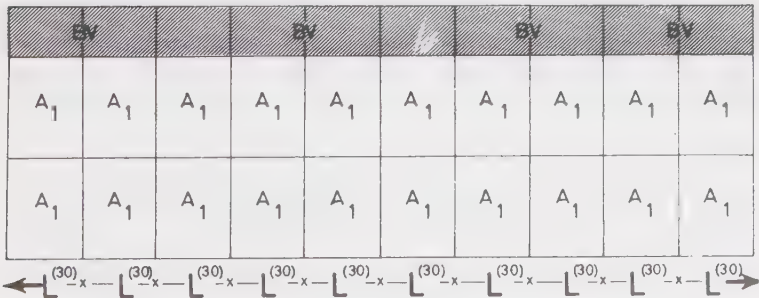


Abb. 6

a) Erweiterungen und Komplikationen des Problemansatzes

Ähnlich wie beim eindimensionalen Problem lassen sich auch bei diesem Ansatz technologische Komplikationen bzw. Erweiterungen berücksichtigen.

aa) Beschränkte Anzahl von Längs- und Querschneidern

Beschränkte verfügbare Längs- und Querschneidvorrichtungen erlauben es nicht, alle möglichen Längen- bzw. Breitenkombinationen durchzuführen. Diese technologische Beschränkung ist im Problemansatz dadurch zu berücksichtigen, daß die die Restriktion überschreitenden Kombinationen in die (Kombinations-)Tabelle nicht aufgenommen werden. Dies bedeutet im Zweifelsfall eine Erhöhung des Verschnitts, da vor allem die für eine Optimierung wichtigen kleinflächigen Kombinationen nur beschränkt vorhanden sind.

Im Falle der Glasfabrik ließe sich aber die geringe Anzahl der Schneidvorrichtungen durch wiederholtes Schneiden ausgleichen. Die Frage bleibt dabei, was günstiger ist, die Inkaufnahme eines schlechten Optimums oder die Zeit- bzw. Kostenerhöhung, die durch das wiederholte Schneiden auftritt.

bb) Die Einführung von Höchst- bzw. Mindestmengen

Bestimmte gängige Scheibengrößen können zur Abrundung der Kombinationsmöglichkeiten nicht nur in Mindest-, sondern auch in Höchstmengen produziert werden, da eine große Wahrscheinlichkeit besteht, daß diese Scheibengrößen in absehbarer Zeit wieder bestellt werden. Anstelle des Gleichungssystems

$$A\bar{x} = D$$

tritt auch im zweidimensionalen Fall das Ungleichungssystem

$$AX \geq D_1$$

$$AX \leq D_2, \text{ wobei } D_1 \leq D_2 \text{ ist.}$$

Kritisch läßt sich hierzu bemerken, daß sich mit dem Ungleichungssystem der Rechenaufwand beträchtlich erhöht.

cc) Die Berücksichtigung unterschiedlich großer Rohglastafeln

Stehen verschieden große Rohglastafeln zur Verfügung, so läßt sich ohne weiteres eine Matrix der Schnittkombinationen für alle Rohglastafeln $B_n \cdot L_m$ bilden; allerdings mit der Voraussetzung, daß die Rohglastafeln gleichwertig sind und in beliebiger Menge zur Verfügung stehen. Der Ansatz mit einer genau bestimmten Zahl von verschiedenen großen Rohglastafeln ist ähnlich wie im eindimensionalen Problem nicht möglich. Eine optimale Planung hat also bei gegebenen Aufträgen von der Verschnittminimierung auszugehen und aus deren Ergebnis dann die Bestellungen an die Zieh Bühne abzuleiten. Da sich größere Tafeln besser kombinieren lassen, wird dies zu einer Überbelastung der breiteren Ziehmaschinen führen. Durch die Multiplikation der Verschnitte der größeren Tafeln mit Zusatzfaktoren¹⁾ läßt sich diese Entwicklung wenigstens der Tendenz nach beeinflussen.

Die Berücksichtigung eines bestimmten Mengenverhältnisses der verschiedenen Rohglastafeln ist ähnlich wie beim eindimensionalen Fall durch Einführung einer Zusatzgleichung möglich.

dd) Rechnerische Schwierigkeiten und kritische Würdigung

Die Überlegungen bezüglich der praktisch durchführbaren Berechnungen mit Hilfe eines Computers beim eindimen-

1) Vgl. hierzu auch die Ausführungen beim eindimensionalen Fall.

sionalen Problem gelten sinngemäß auch hier. Allerdings ist die Zahl der Schnittkombinationen hier noch wesentlich größer als beim vergleichbaren eindimensionalen Beispiel. Eine Einschränkung läßt sich auch hier dadurch erzielen, daß Schnittkombinationen ab einer bestimmten Verschnittgröße ausgeschlossen werden.

Bei all unseren Überlegungen sind wir bisher von einer bestimmten Breite ausgegangen, obwohl in der Wirklichkeit die verwertbare Breite der gleichen Ziehmaschine Schwankungen unterworfen ist. Mit dem Ansatz durchschnittlicher Verwertungsbreiten kann der Schneider bei Schnittkombinationen mit geringem oder überhaupt keinem Breitenverschnitt in Schwierigkeiten geraten, wenn er Glas mit sehr breiter Borte geliefert bekommt. Andererseits gibt es dann aber wieder Rohglas, das weiter als vorgesehen verwertbar ist. Innerhalb der Kombinationsmatrix läßt sich dieser Fall durch das Zulassen von Breitentoleranzen ohne weiteres berücksichtigen. Die praktische Durchführung der Zuteilung auf die Schneider mit Aufträgen mit geringem Breitenverschnitt kann nach Augenscheinkontrolle von der Ziehbühne aus erfolgen. Inwieweit sich diese Vorschläge organisatorisch verwirklichen lassen, müßte allerdings erst der praktische Versuch erbringen. Wollen wir diesen Schwierigkeiten aus dem Wege gehen, genügt der Ansatz einer Mindestbreite, die immer garantiert sein muß.

Die beiden hier dargestellten mathematischen Ansätze der Verschnittoptimierung sind Hauptprobleme der Glasfabrik und können ohne wesentliche Abwandlungen bei der Fertigungsplanung (Bereitstellungsplanung) Verwendung finden. Gelingt es mit ihrer Hilfe, den Gesamtverschnitt nur um einige wenige Prozent zu senken, so bedeutet dies für die Glasfabrik beträchtliche absolute Kostenersparnisse, die auch größere Aufwendungen für eine gewiß notwendige Umorganisation rechtfertigen würden.

S c h l u ß

=====

Ziel dieser Arbeit ist es gewesen, die im 1. Teil dieser Arbeit aufgeführten Verfahren von Operations Research an den sich ergebenden Problemstrukturen der Fertigungsplanung der Glasfabrik mittels einfacher, problemadäquater Beispiele darzustellen. Es hat sich dabei gezeigt, daß aus der Vielzahl operationsanalytischer Anwendungsmöglichkeiten - wie wir sie im theoretischen Teil aufgeführt haben - mit der Themenbeschränkung auf den Fertigungsbereich und weiter auf die spezifischen Verhältnisse der Glasfabrik von vornherein eine große Zahl mangels Problemadäquanz nicht behandelt werden konnte. Bei den verbliebenen und dargestellten Modellen handelt es sich im wesentlichen um Aufgaben, die ein relativ begrenztes Gebiet umfassen, deren Größen weitgehend an technischen Vorgängen orientiert, daher verhältnismäßig leicht quantifizierbar sind, und die das Prinzip der Wiederholung (repetition of action) erfüllen. "Einzel-Aufgaben" mit Projekt-Charakter sind allenfalls im Bereich der Netzwerkanalyse anzutreffen.

Alle Aufgaben mit den dargestellten Beispielen operationsanalytischer Verfahrenstechniken sollten nur das Ziel aufzeigen, der Unternehmensführung quantifizierte Unterlagen über verschieden mögliche Verhaltensweisen an die Hand zu geben, denn mit Operations Research werden keine Entscheidungen gefällt, sondern stets nur die Unterlagen für sie erarbeitet. Die Lösung jedes Entscheidungsproblems, d.h. die Bestimmung einer der jeweiligen Zielsetzung der Unternehmung adäquaten Verhaltensweise, ist und bleibt ein individuell geprägter geistiger Prozeß, der in einem Entschluß für eine von mehreren möglichen Verhaltensweisen gipfelt, wobei die mit Operations Research beschafften Unterlagen nur Hilfsstellung ausüben. Daß bei einzelnen Entscheidungsproblemen auch

Überlegungen nicht-quantitativer Art zum Zuge kommen, sei es, daß die Größen und Zusammenhänge nicht quantifizierbar sind, sei es, daß bei jeder Entscheidung ein letzter, rational nicht auflösbarer, intuitiver Rest verbleibt, braucht nur der Vollständigkeit wegen erwähnt zu werden. Jedes unternehmerische Entscheidungsproblem hat eben mehr als nur ökonomische Aspekte und jede Entscheidung wurzelt in jener Irrationalität, die das Geheimnis individueller Art zu denken und zu handeln bleibt.¹⁾

Viele der hier angeführten Beispiele lassen noch ein wünschenswertes Maß an Realitätsbezogenheit der Verhältnisse der Glasfabrik vermissen. Dies stellt aber keinen Einwand gegen die Anwendung operationsanalytischer Verfahren schlechthin dar, denn die Konzentration auf das Problem an sich und der hohe Abstraktionsgrad der meisten Modelle erlaubt auch einem Leser, der

a) mit den tatsächlichen Verhältnissen der Glasfabrik wenig vertraut und

b) auch die Methoden nicht näher beherrscht

eine ausreichende Information. Selbstverständlich lassen sich alle angeführten Modelle wesentlich umfangreicher und wirklichkeitsnäher konstruieren. Einzelne Verfeinerungen, aber auch Vereinfachungen, sind in den Unterkapiteln dargestellt worden.

Auf die Schwierigkeiten der Datenerfassung und -verarbeitung aufgrund mangelnder Beherrschbarkeit der Produktion ist an entsprechender Stelle hingewiesen worden. Die Sorge der Erfassung schwer quantifizierbarer Tatbestände hat uns etwa bei der Berücksichtigung der Qualität beschäftigt.

1) Vgl. Gutenberg, E.: Grundlagen ..., a.a.O., S. 130

Die Aufgabe eines Betriebswirtes, der diese Verfahren beherrscht, besteht nicht darin, solche Modelle mathematisch exakt zu formulieren und zu lösen, sondern er soll bei der Modellkonstruktion mitwirken, um für eine ausreichende ökonomische Problemadäquanz Sorge zu tragen. Denn nur die Ergebnisse isomorpher Modelle können nämlich zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Er soll weiter die Lösungen der mathematisch-statistischen und wenn notwendig logistischen Ansätze in eine jedem verständliche, verbale Sprache übertragen können.

Die Gesamtliteratur über Operations Research ist trotz der kurzen Entwicklungszeit schon so umfangreich und für Spezialprobleme zum Teil so kompliziert, daß sie nur noch für Spezialisten zu übersehen bzw. verstehen ist; die angeführten Quellenangaben können deshalb keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben.

Für die zukünftige Entwicklung von Operations Research zeichnen sich zwei Richtungen ab. Einmal werden neue, operationsanalytisch bisher noch nicht geklärte Teilprobleme zu lösen versucht und für die bereits behandelten Aufgaben verfeinerte Modelle entwickelt. Zum anderen versucht man, bisher bekannte Suboptima zu übergeordneten Optima zu verknüpfen. Hierzu verwendet man besonders die Simulationstechnik.

Abschließend läßt sich feststellen, daß man die Leistung dieser Methoden nicht nur kritisch betrachten sollte - ist doch die Kritik zum großen Teil nur die Folge ihres Versuches, "Phänomene der modernen Produktion in realistischer Weise gedanklich zu erfassen und gleichzeitig der Unternehmensführung ein brauchbares Instrument der Lenkung und Kontrolle zur Hand zu geben, ..." ¹⁾ - son-

1) Wittmann, W.: Lineare ..., a.a.O., S. 16

dern auch als ein neues Mittel, das uns zum neuerlichen Durchdenken unseres Faches gerade dort anregt, wo man allzu gern bereit ist, sich von den Schwierigkeiten geschlagen zu geben. Im Sinne unseres einführenden Leitwortes sollte diese Arbeit ein Versuch zum "slow and continuous growth" unserer Wissenschaft sein.

Literaturverzeichnis

=====

I. Sammelwerke

- Agthe, K.: Das Problem der unsicheren Erwartungen bei unternehmerischen Planungen und Entscheidungen.
In: Unternehmensplanung. Hrsg.: Agthe, K. - Schnauffer, E., S. 23 - 120.
Baden-Baden 1963.
- Apostel, L.: Towards the Formal Study of Models in the Non-Formal Science.
In: The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences. Hrsg.: Freudenthal, H., S. 1 - 37.
Dordrecht 1961.
- Arnoff, E.L. - Sengupta, S.S.: Mathematical Programming.
In: Progress in Operations Research, Vol. 1. Hrsg.: Ackoff, R.L., S. 106 - 210.
New York - London 1961.
- Beste, Th.: Fertigungswirtschaft und Beschaffungswesen.
In: HdW, Bd. 1, S. 125 - 297.
Köln - Opladen 1958.
- Beste, Th.: Fertigungsprogramm.
In: HWB, 3. Aufl., Bd. 1, Sp. 1745 - 1756.
Stuttgart 1956.
- Bußmann, K.F.: Fertigungsplanung.
In: HWB, 3. Aufl., Bd. 1, Sp. 1742 - 1749.
Stuttgart 1956.
- Deacon, A.R.L. jr.: Some Explanatory Notes and Guides for the General Reader.
In: AMA Management Report Nr. 55 - Simulation and Gaming: A Symposium, S. 5 - 7.
New York 1961.
- Dean, B.V.: Replacement Theory.
In: Progress in Operations Research, Hrsg.: Ackoff, R.L., S. 327 - 362.
New York 1961.

- Frey, G.: Symbolische und ikonische Modelle.
In: The Concept and the Role of the Model in Mathematics and Natural and Social Sciences. Hrsg.: Freudenthal, H. - S. 89 - 97.
Dordrecht 1961.
- Förstner, K.: Die Aufstellung von Produktionsplänen bei der Papiererzeugung.
In: Operations Research - Verfahren I. Hrsg.: Henn, R., S. 73 - 92.
Meisenheim am Glan 1963.
- Goodeve, Ch.: Operational Research as a Science.
In: Operations Research for Management, Vol. 1. Hrsg.: Mc Closkey, J.F. - Trefethen, F.N., S. 49 - 65.
Baltimore 1954.
- Grochla, E.: Das Problem der optimalen Unternehmensplanung.
In: Gegenwartsfragen der Unternehmung - Offene Fragen der Betriebswirtschaft. Hrsg.: Bellinger, B., S. 65 - 74.
Wiesbaden 1961.
- Hanssmann, F.: A Survey of Inventory Theory from the Operations Research Viewpoint.
In: Progress in Operations Research, Vol. 1, Hrsg.: Ackoff, R.L., S. 65 - 104.
New York - London 1961.
- Hasenack, W.: Funktionenlehre, betriebswirtschaftlich.
In: HWB, 3. Aufl., Bd. 2, Sp. 2096 - 2105.
Stuttgart 1956.
- Hitch, Ch. -
Mc Kean, R.: Suboptimization in Operations Research.
In: Operations Research for Management, Vol. 1. Hrsg.: Mc Closkey, F. - Trefethen, F.N., S. 169 - 186.
Baltimore 1954.
- Holt, Ch.C.: Priority Rules for Minimizing the Cost of Queues in Machine Scheduling.
In: Industrial Scheduling. Hrsg.: Muth, J.F. - Thompson, G.L., S. 83 - 98.
Englewood Cliffs N.J. 1963.

- Johnson, S.M.: Optimal Two and Three-Stage Production Scheduling with Setup Times Included.
In: Industrial Scheduling. Hrsg.: Muth, J.F. - Thompson, G.L., S. 13 - 20.
Englewood Cliffs, N.J. 1963.
- Käfer, K.: Betriebswirtschaftliche Verfahrens-
forschung im Dienste der Unterneh-
mensführung.
In: Aktuelle Fragen der Unterneh-
mung - Gedenkschrift für Alfred
Walther. Hrsg.: Ulrich, H. - Trech-
sel, F., S. 109 - 141.
Bern 1957.
- Kern, W.: Die Empfindlichkeit linear geplanter
Programme.
In: Betriebsführung und Operations
Research. Hrsg.: Angermann, A.,
S. 49 - 79.
Frankfurt/Main 1963.
- Kenessey, Z.: Die Simulation der Wirtschaftspro-
zesse und die Makromodelle.
In: Matnematik und Kybernetik in der
Ökonomie. Internationale Tagung -
Berlin, Ost 1964. Konferenzproto-
koll, Teil I, S. 38 - 55.
Berlin 1965.
- Kilger, W.: Planungsrechnung und Entscheidungs-
modelle des Operations Research.
In: AGPLAN - Unternehmensplanung
als Instrument der Unternehmensfüh-
rung. Bd. 9, S. 55 - 75.
Wiesbaden 1965.
- Kloidt, H.: Betriebsprozeß.
In: HWB, 3. Aufl., Bd. 1, Sp. 824 -
828.
Stuttgart 1956.
- Krelle, W.: Gelöste und ungelöste Probleme der
Unternehmensforschung.
In: Arbeitsgemeinschaft für For-
schung des Landes Nordrhein-Westfa-
len, Heft 105, S. 7 - 43.
Köln - Opladen
- Künzi, H.-P.: Nichtlineare Programmierung.
In: Operations Research-Verfahren I.
Hrsg.: Henn, R., S. 96 - 114.
Meisenheim/Glan 1963.

- Manne, A.S.: On the Job Shop Scheduling Problem.
In: Industrial Scheduling. Hrsg.:
Muth, J.F. - Thompson, G.L., S.
187 - 192.
Englewood Cliffs, N.J. 1963.
- Morgenthaler, G.W.: The Theory and Application of Simulation in Operations Research..
In: Progress in Operations Research.
Vol. 1. Hrsg.: Ackoff, R.L., S.
363 - 419.
New York - London 1961.
- Morgenstern, O.: The Accuracy of Economic Observations.
In: Activity Analysis of Production and Allocation. Proceedings of a Conference - Cowles Commission for Research in Economics. Monograph Nr. 13. Ed.: Koopmans, T.C., S.
281 - 284.
New York - London 1951.
- Neuschel, R.F.: Lagerwirtschaft.
In: Handbuch des Industrial Engineering - Gestaltung, Planung und Steuerung industrieller Arbeit.
Hrsg.: Maynard, H.B. - Dt.: Krüger, K., S. 97 - 148, Teil IV.
Berlin - Köln - Frankfurt 1956.
- Pocock, J.W.: Management Consulting and Operations Research.
In: Operations Research for Management, Vol. 1. Hrsg.: Mc Closkey, J.F. - Trefethen, F.N., S. 80 - 96.
Baltimore 1954.
- Reinitz, R.C.: On the Job-Shop Scheduling Problem.
In: Industrial Scheduling. Hrsg.:
Muth, J.F. - Thompson, G.L., S. 59 - 82.
Englewood Cliffs, N.J. 1963.
- Schäfer, E.: Grundfragen der Betriebswirtschaftslehre.
In: HdW, Bd. 1, S. 11 - 46.
Köln - Opladen 1958.
- Schäfer, E.: Absatzwirtschaft.
In: HdW, Bd. 1, S. 299 - 379.
Köln - Opladen 1958.

- Schäfer, E.: Die Funktionalbetrachtung in der Betriebswirtschaftslehre.
In: Gegenwartsprobleme der Betriebswirtschaft - Festschrift für W. le Coutre, Hrsg.: Henzel, F., S. 11 - 24.
Baden-Baden - Frankfurt/Main 1955.
- Schnauck, W.: Glaslexikon - Ein Handbuch für Handwerk, Handel und Industrie.
München 1959.
- Seidenfus, H.St.: Zur Theorie der Erwartungen.
In: J.M. Keynes als "Psychologe".
Hrsg.: Schmolders, G. - Schröder, R. - Seidenfus, H.St., S. 97 - 134.
Berlin 1956.
- Sieber, E.: Das Planspiel unternehmerischer Entscheidungen.
In: Betriebsführung und Operations Research. Hrsg.: Angermann, A., S. 80 - 123.
Frankfurt/Main 1963.
- Sisson, R.L.: Sequencing Theory.
In: Progress in Operations Research, Vol. 1. Hrsg.: Ackoff, R.L., S. 293 - 326.
New York - London 1961.
- Story, A.E. - Wagner, H.M.: Computational Experience with Integer Programming for Job - Shop Scheduling.
In: Industrial Scheduling. Hrsg.: Muth, J.F. - Thompson, G.L., S. 207 - 224.
Englewood Cliffs, N.J. 1963.
- Trefethen, F.N.: A History of Operations Research.
In: Operations Research for Management, Vol. 1. Hrsg.: Mc Closkey, J.F. - Trefethen, F.N., S. 3 - 35.
Baltimore 1954.
- Wetzel, W.: Theoretische Grundlagen des linearen Programmierens, der Einsatz-Ausstoß-Analyse und der Spieltheorie.
In: Anwendungen der Matrizenrechnung auf wirtschaftliche und statistische Probleme. Hrsg.: Adam, A. und andere, S. 129 - 183, 2. durchges. und erw. Aufl.,
Würzburg 1963.

White, M.C.:

Multiple Goals in the Theory of the Firm.

In: Linear Programming and the Theory of Firm (Second Printing).

Hrsg.: Boulding, K.E. - Spivey, A.W., S. 181 - 216.

New York 1961.

II. Dissertationen

- Adam, D.: Produktionsplanung bei Sortenfertigung. - Ein Beitrag zur Theorie der Mehrproduktunternehmung.
Diss. Hamburg 1965.
- Becker, J.: Die unternehmerischen Entscheidungen als Gegenstand der Betriebswirtschaftslehre.
Diss. Nürnberg 1960.
- Böhm, W.: Die Planungsforschung (Operations-Research) in der Theorie der Unternehmung.
Diss. Mannheim 1959.
- Böhmer, E.: Industriebetriebliche Kostenkurven und ihre Bedeutung für die Preispolitik.
Diss. Mainz 1951.
- Bohmer, R.: Die Anwendbarkeit der linearen Programmierung auf betriebswirtschaftliche Planungsprobleme.
Diss. Köln 1963.
- Bryton, B.: Balancing of a Continuous Production Line, Unpublished M. S. Thesis - Northwestern University Evanston, Juni 1954. Zitiert nach Dick, R.: Zur Prozeßplanung der Fließfertigung.
Diss. Köln 1966.
- Danner, D.: Die Ablaufplanung mehrstufiger diskontinuierlicher Prozesse.
Diss. Mannheim 1963.
- Dick, R.: Zur Prozeßplanung der Fließfertigung.
Diss. Köln 1966.
- Dinkelbach, W.: Zum Problem der Losgröße und des Sortenwechsels bei der Produktionsplanung.
Diss. Köln 1963.
- Dischner, K. H.: Die Bestimmung der wirtschaftlichen Produktions- und Absatzmenge bei industrieller Sortenfertigung unter Anwendung der Linearen Programmierung.
Diss. Mannheim 1960.

- Fonzi, F.: Beitrag zur Anwendung mathematischer Methoden für eine wirtschaftlichere Gestaltung der Fertigung.
Diss. Aachen 1959.
- Hofmann, R.: Gewinnoptimale Unternehmungssteuerung bei gegebenem Produktions- und Absatzprogramm.
Diss. St. Gallen 1962.
- Henschel, A.: Kostenverlauf bei schwankender Massenproduktion in einem Betrieb mit einfacher und kombinierter Fertigung.
Diss. Bonn 1951.
- Kaps, H.: Die Bedeutung der Lagerhaltung für die Produktionsplanung in Industriebetrieben.
Diss. TH Aachen 1964.
- Kilian, R.: Die Bestimmung wirtschaftlicher Erzeugnislosgrößen und -rhythmen, sowie ihre optimale Verteilung über den Planzeitraum.
Diss. Dresden 1962.
- Krämer, E.: Das Werkstättensystem - Insbesondere seine Entwicklung, seine Formen und seine Auswirkungen.
Diss. in Vorbereitung Nürnberg 1969.
- Lanzenauer, v.Chr.: Optimale Lagerhaltung im Produktionsprozeß.
Diss. Bonn 1966.
- Neumann, Th.: Der elektronische Analogrechner als Hilfsmittel bei der Lösung betriebswirtschaftlicher Probleme, dargestellt am Beispiel der Optimierungs- und Simulationsprobleme.
Diss. München 1964.
- Peters, B.: Die Bestimmung der optimalen Losgröße - Eine Anwendung der Nichtlinearen Programmierung.
Diss. Göttingen 1961.
- Popp, W.: Bestimmung von kostenoptimaler Mindestlosgröße und Lagererneuerungsgrenze.
Diss. München 1961.
- Reiners, H.: Erscheinungsformen der Fließfertigung.
Diss. in Vorbereitung Nürnberg 1969.

- Schlüter, H.: Untersuchungen zum Problem der optimalen Losgröße.
Diss. Frankfurt/Main 1958.
- Schmidt, K.-U.: Beitrag zur Theorie der Entscheidungsmodelle.
Diss. Heidelberg 1960.
- Scholl, E.: Die lineare Planungsrechnung unter besonderer Berücksichtigung linearer Verteilungsmodelle.
Diss. Mannheim 1959.
- Siepert, H.M.: Der Einfluß der Losgröße auf die Produktionsplanung in Walzwerken.
Diss. Köln 1958.
- Steinmann, H.: Lineare Produktionsmodelle der kurzfristigen Programmplanung - Zur statischen Produktionstheorie auf der Grundlage der linearen Planungsrechnung.
Nat.wiss. Diss. Clausthal 1962.
- Strnad, H.: Die Steuerung industrieller Fertigung in kybernetischer Sicht - unter besonderer Berücksichtigung von Störeinflüssen.
Diss. Darmstadt 1963.
- Wacker, J.: Entwicklung und Bestimmungsgründe unternehmerischer Entscheidung.
Diss. München 1963.
- Weinberg, F.: Über die Anwendung mathematischer Methoden mit spezieller Würdigung der Wahrscheinlichkeitsrechnung in der Termin-Grobplanung für differenzierte Fabrikationsprogramme bei vorwiegender Serienfertigung.
Diss. Zürich 1954.
- Winkler, D.: Die kurzfristige Abstimmung zwischen Produktion und Lagerung unter besonderer Berücksichtigung des Lagerbereichs. - Probleme und Lösungsverfahren.
Diss. Saarbrücken 1964.
- Ziegler, H.: Die Lagerverwaltung im Fabrikbetrieb.
Diss. Mannheim 1934.
- Zimmermann, H.-J.: Mathematische Entscheidungsforschung und ihre Anwendung auf die Produktionspolitik.
Diss. Berlin 1963.

III. Bücher

- Abromeit, G.: Erzeugnisplanung und Produktionsprogramm im Lichte der Produktions-, Absatz- und Wettbewerbspolitik. Wiesbaden 1955.
- Albach, H.: Produktionsplanung auf der Grundlage technischer Verbrauchsfunktionen. In: Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen, Heft 105, S. 45 - 109.
- Albach, H.: Wirtschaftlichkeitsberechnungen bei unsicheren Erwartungen. Köln - Opladen 1959.
- Allen, R.G.D.: Mathematik für Volks- und Betriebswirte. Dt.: Kosiol, E. Berlin 1959.
- Anderson, O.: Probleme der statistischen Methodenlehre in den Sozialwissenschaften, 5. Aufl. Würzburg 1965.
- Angermann, A.: Industrielle Planungsrechnung, Bd. 1, Entscheidungsmodelle. Frankfurt/Main 1963.
- Arnold, R.D. - Villoria, R.L.: Network - Based Management Systems (PERT / CPM). New York - London - Sydney 1967.
- Arrow, K. - Karlin, S. - Scarf, H.: Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production. Stanford (Calif.) 1958.
- Beckmann, M.J.: Lineare Planungsrechnung - Linear Programming. Ludwigshafen am Rhein 1959.
- Bellman, R.: Dynamic Programming. Princeton 1957.
- Bellman, R.E. - Dreyfus, St.E.: Applied Dynamic Programming. Princeton 1962.
- Beyersdorfer, P.: Glashüttenkunde. Leipzig 1964.

- Billeter, E.P.: Der praktische Einsatz elektronischer Rechenautomaten. 2. verb. Aufl. Wien 1964.
- Bochenzki, J.M.: Die zeitgenössischen Denkmethoden. 2. neubearb. Aufl. 1959, Deutschl. München. Bern 1954.
- Böhm, H.-H. - Wille, F.: Direct Costing und Programmplanung (Moderne Kalkulationsverfahren für gewinnoptimale Produktions- und Verkaufsprogramme.) München 1960.
- Böhm, H.-H. Operationenforschung - Moderne Vorbereitung unternehmerischer Entscheidungen. Berlin 1961.
- Bonhoeffer, K.F.: Über physikalisch-chemische Modelle von Lebensvorgängen. Berlin 1948.
- Boulding, K.E. - Spivey, A.W.: Linear Programming and the Theory of the Firm. 2nd Printing. New York 1960.
- Brand, H.W.: Über die Fruchtbarkeit mathematischer Verfahren in der Wirtschaftstheorie. Meisenheim/Glan 1959.
- Brusberg, H.: Der Entwicklungsstand der Unternehmensforschung mit besonderer Berücksichtigung der Bundesrepublik Deutschland. Wiesbaden 1965.
- Buffa, E.S.: Models for Production and Operations Management. New York - London 1963.
- Bußmann, K.F.: Betriebswirtschaftliches Risiko. Meisenheim/Glan 1955.
- Churchman, C.W. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Introduction to Operations Research. New York 1957.
- Churchman, W.C. - Ackoff, R.L. - Arnoff, E.L.: Operations Research - Eine Einführung in die Unternehmensforschung. Dt.: Schlecht, E. - Fersch, F., Engl.: Org.-Titel: Introduction to Operations Research. 4. Aufl. 1959. Wien - München 1961.

- Danø, S.: Linear Programming in Industry - Theory and Application. 3d Revised Edition. Wien - New York 1965.
- Dantzig, G.B.: Lineare Programmierung und Erweiterungen. Dt.: Jäger, A. Berlin - Heidelberg - New York 1966.
- Dean, J.: Managerial Economics. New York 1951.
- Dinkelbach, W.: Zum Problem der Produktionsplanung in Ein- und Mehrproduktionsunternehmen. Würzburg - Wien 1964.
- Dorfman, R. - Samuelson, P.A. - Solow, R.M.: Linear Programming and Economic Analysis. New York - Toronto - London 1958.
- Eichenberger, H.: Ökonomische Methoden in der linearen Planungsrechnung. (Schriftenreihe des Instituts für Automation und Unternehmensforschung der Universität Freiburg/Schweiz). Hamburg - Berlin 1963.
- Eicke, K.: Auftragsvorbereitung im Rahmen der betriebswirtschaftlichen Organisation. Frankfurt/Main 1952.
- Ellinger, Th.: Ablaufplanung - Grundfragen der Planung des zeitlichen Ablaufs der Fertigung im Rahmen der industriellen Produktionsplanung. Stuttgart 1959.
- Faure, R. - Boss, J.P. - Le Garff, A.: Grundkurs der Unternehmensforschung für Studierende und Praktiker. Dt.: Th. Cornides, Franz.: La recherche opérationnelle. München 1962.
- Ferguson, R.O. - Sargent, L.F.: Linear Programming: Fundamentals and Applications. New York - Toronto - London 1958.
- Fletcher, A. - Clarke, G.: Mathematische Hilfsmittel der Unternehmensführung. Dt.: Pack, L., Engl.: Management and Mathematics - The Practical Techniques Available 1964. München 1966.

- Forker, H.J.: Das Wirtschaftlichkeitsprinzip und das Rentabilitätsprinzip und ihre Eignung zur Systembildung. Berlin 1960.
- Fourastié, J.: Die große Hoffnung des 20. Jahrhunderts. Köln 1954.
- Gass, S.J.: Linear Programming - Methods and Applications. New York - Toronto - London 1958.
- Gebhardt, A.: Glasindustrie - Strukturelle Probleme und Wachstumschancen. - Ifo-Institut für Wirtschaftsforschung - Reihe Industrie, Heft 2. München 1964.
- Gebhardt-Seele, P.: Rechenmodelle für wirtschaftliches Lagern und Einkaufen - Disposition mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen. München - Wien 1962.
- ohne Verfasser: General Purpose System Simulator III - User's Manual. IBM Application Program Form H 20 - 0163 - 1.
- Greenlaw, P.S. - Herron, L.W. - Rawdon, R.H.: Business Simulation in Industrial and University Education. Englewood Cliffs, N.J. 1962.
- Grochla, E.: Betriebs- und Wirtschaftsordnung. Berlin 1954.
- Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Bd. I - Die Produktion, 12. Aufl. Berlin - Heidelberg - New York 1966.
- Hadley, G.: Nonlinear and Dynamic Programming. Reading - Palo Alto - London 1964.
- Hadley, G. - Whitin, T.M.: Analysis of Inventory Systems. Englewood Cliffs, N.-J. 1963.
- Hanssman, F.: Operations-Research in Production and Inventory Control. New York - London 1962.
- Hart, A.G.: Anticipation, Uncertainty and Dynamic Planning. New York 1951.

- Hartmann, B.: Betriebswirtschaftliche Grundlagen der automatisierten Datenverarbeitung. Freiburg i.Br. 1961.
- Heineken, W.: Exakte Methoden der Unternehmensführung. Karlsruhe 1963.
- Heller, J.: Combinatorial, Probabilistic and Statistical Aspects of an $M \times J$ Scheduling Problem - AEC-Report N 90 2540. Zitiert nach Sisson, R.: Sequencing Theory. New York 1959.
- Herrmann, E.: Spieltheorie und lineares Programmieren. Köln 1964.
- Hofmann, W.: Lehrbuch der Mathematik für Volks- und Betriebswirte. Differential, Integral, Vektor und LP-Bereich. Frankfurt/Main - Berlin 1967.
- Holl, F.: Die bayerische Glasindustrie gestern, heute, morgen. - Wirtschafts- und Sozialpolitische Studie über die Entwicklung der Glasindustrie des Bayrischen und Oberpfälzer Waldes. Zwiesel 1965.
- Holt, G.C. -
Modigliani, F. -
Muth, J.F. -
Simon, H.A.: Planning Production, Inventories and Work Force. Englewood Cliffs, N.J. 1960.
- Hoss, K.: Fertigungsablaufplanung mittels operationsanalytischer Methoden unter besonderer Berücksichtigung des Ablaufplanungsdilemmas in der Werkstattfertigung. Würzburg - Wien 1965.
- Hürlimann, W.: Lineare Programmierung - Eine Einführung für Nicht-Mathematiker. Zürich - Düsseldorf 1963.
- Jebsen-Marwedel, H.: TAFELGLAS - Eine Werkstoffkunde für alle Verbraucher des Tafelglases, für das Glaserhandwerk und das Baugewerbe mit 417 Fotos und Zeichnungen. 1. Aufl. Essen 1950.

- Jebsen-Marwedel, H.: Glastechnische Fabrikationsfehler. Eine pathologische Technologie des Werkstoffes Glas. Berlin - Göttingen - Heidelberg 1959.
- Jöhnk, M.-D.: Lagerbestandsplanung für ein zyklisches Bestellverfahren. Berichte aus dem Institut für Statistik und Wirtschaftsmathematik der FU Berlin. Hrsg.: Wetzel, W. - Munzner, H., Heft 1. Würzburg 1967.
- Joksch, H.C.: Lineares Programmieren. Tübingen 1962.
- Kade, G.: Die logischen Grundlagen der mathematischen Wirtschaftstheorie als Methodenproblem der theoretischen Ökonomik. Berlin 1958.
- Kalveram, W.: Industriebetriebslehre, 7. Aufl. Wiesbaden 1960.
- Kaufmann, A.: Méthodes et Modèles de la Recherche Opérationnelle (Les Mathématiques de l'Entreprise). Paris 1962 I Tome; Paris 1964 II Tome.
- Kern, W.: Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung. Köln - Opladen 1962.
- Kern, W.: Operations Research - Eine Einführung in die Optimierungskunde. Sammlung Poeschel. Stuttgart 1964.
- Kern, W.: Optimierungsverfahren in der Ablauforganisation - Gestaltungsmöglichkeiten mit Operations Research. Essen 1967.
- Kilger, W.: Produktions- und Kostentheorie. Wiesbaden 1958.
- Kitaigorodski, J.J.: Technologie des Glases. Dt.: Winkler, J. (Gesamtredaktion) München, Berlin 1957.

- Knight, F.H.: Risk, Uncertainty and Profit.
8. Aufl.
New York 1957.
- Krekó, B.: Lehrbuch der linearen Optimierung.
Berlin 1964.
- Krelle, W. -
Künzi, H.P.: Lineares Programmieren.
Zürich 1958.
- Kreyszig, E.: Statistische Methoden und ihre An-
wendungen.
Göttingen 1965.
- Kromphardt, W. -
Henn, R. -
Förstner, K.: Lineare Entscheidungsmodelle.
Berlin - Göttingen - Heidelberg
1962.
- Kubatz, H.: Standorttendenzen und Standortverla-
gerungen in der deutschen Flachglas-
industrie vom betriebswirtschaftli-
chen Standpunkt.
o.O. und o.J.
- Kulhavy, E.: Operations Research - Die Stellung
der Operationenforschung in der Be-
triebswirtschaftslehre.
Wiesbaden 1963.
- Künzi, H.P. -
Krelle, W.: Nichtlineare Programmierung.
Berlin - Göttingen - Heidelberg
1962.
- Lambrecht, St.: Die Soziologie.
Stuttgart 1958.
- Lassmann, G.: Die Produktionsfunktion und ihre Be-
deutung für die betriebswirtschaft-
liche Kostentheorie - Beitrag zur
betriebswirtschaftlichen Forschung,
Bd. 6.
Köln - Opladen 1958.
- Lesourne, J.: Unternehmensführung und Unterneh-
mensforschung. Dt.: Günther, R. -
v. Cornides, Th., 2. Aufl.,
Franz.: Technique Economique et
Gestion Industrielle.
München - Wien 1964.
- Linder, A.: Statistische Methoden. 2. Aufl.
Basel 1951.
- Luce, D.R. -
Raiffa, H.: Games and Decisions - Introduction
and Critical Survey.
New York 1957.

- Lyle, Ph.: Regression Analysis of Production Costs and Factory Operations. 3rd Edition: Revised by Tippet, L.H.C. London 1957.
- Magee, J.F.: Production Planning and Inventory Control. New York - Toronto - London 1958.
- Marcus, P.: Der ökonomische Inhalt der linearen Planungsrechnung. - dargestellt an Beispielen aus der Energiewirtschaft. Schriftenreihe d. Energiewirtschaftlichen Instituts an der Universität Köln, Bd. XII. München 1966.
- Margoninsky, B.: Wirtschaftliche Lagerhaltung. München - Berlin 1933.
- Markowitz, H.M. - Hausner, B. - Karr, H.W.: SIMSCRIPT: A Simulation Programming Language. Englewood Cliffs 1963.
- Marshall, A.: Principles of Economics. An Introductory Volume (8th Ed.) London 1961, S. V.
- Mathieu, J. - Zimmermann, W.: Bestimmung des optimalen Produktionsprogrammes in Industriebetrieben (Rationalisierung der Programmplanung). - Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 1111. Köln - Opladen 1962.
- Mawick, P.: Die Konstanten in der Zielfunktion linearer Produktionsprogramme. - Schriftenreihe des Instituts für Automation und Unternehmensforschung der Universität Freiburg (Schweiz), Bd. 5. Hamburg - Berlin 1965.
- Mellerowicz, K.: Betriebswirtschaftslehre der Industrie. Bd. 1 und 2, 5. Aufl. Freiburg i.Br. 1958.
- Mellerowicz, K.: Kosten- und Kostenrechnung. Bd. 1, Bd. 2 - 1. und 2. Teil, 3. Aufl. Berlin 1958.
- Mellerowicz, K.: Planung und Plankostenrechnung. Bd. 1. Freiburg i.Br. 1961.

- Mellerowicz, K.: Unternehmenspolitik. Bd. 1, 2. Aufl.
Freiburg i.Br. 1963.
- Metzger, R.W.: Elementary Mathematical Programming.
New York - London 1958.
- Miller, D.W. - Executive Decisions and Operations
Starr, M.K.: Research.
Englewood Cliffs, N.J. 1960.
- Miller, R.W.: Zeit-Planung und Kosten-Kontrolle
durch PERT. Ein Leitfaden für die
Anwendung in Entwicklung und Ferti-
gung. Dt.: Häger, W. - Klante, H. -
Topel, H.
Berlin 1965.
- Müller, H.: Die elektronische digitale Rechenma-
schine und Grundlagen ihrer Anwend-
barkeit unter besonderer Berücksich-
tigung betriebswirtschaftlicher Auf-
gabenstellungen.
Berlin 1959.
- v. Neumann, J. - Spieltheorie und wirtschaftliches
Morgenstern, O.: Verhalten.
Dt.: Leppig, M. (3. Aufl. 1953).
Würzburg 1961.
- Nicklisch, H.: Die Betriebswirtschaft. 7. Aufl.
Stuttgart 1932.
- Nordsieck, F.: Betriebsorganisation. Lehre und
Technik. Bd. 1 und 2.
Stuttgart 1961.
- PERT: PERT - Program Evaluation and Review
Technique - Eine Methode zur Planung
und Überwachung von Projekten.
Hrsg.: von der Federal Electric
Corporation.
München 1965.
- Peters, B.: Operations Research als modernes
Führungsinstrument und Hilfe hand-
werklichen Wirtschaftens.
Göttingen 1962.
- Pugh, A.L.: Dynamo User's Manual.
Cambridge 1961.
- Reinfeld, N.V. - Mathematical Programming.
Vogel, W.R.: Englewood Cliffs, N.J. 1958.

- RKW - Auslandsdienst: Ablauf- und Planungsforschung - Operations Research - Heft 56. München 1958.
- RKW: Das Rechnen mit Grenzkosten - Direct Costing.
Übersetzung eines amerikanischen Forschungsberichts der National Association of Accountants (NAAC). o.O. 1960.
- Rühli, E.: Optimale Sortimentsplanung mit Linearer Programmierung.
Mitteilungen aus dem handelswissenschaftlichen Seminar der Universität Zürich, Heft 118.
Zürich 1963.
- Saaty, Th.L.: Elements of Queueing Theory with Applications.
New York - Toronto - London 1961.
- Sadowski, W.: Theorie und Methoden der Optimierungsrechnung in der Wirtschaft.
Dt.: Müller, M. - Übersetzung aus dem Polnischen.
Berlin 1963.
- Salmang, H.: Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Glasfabrikation.
Berlin - Göttingen - Heidelberg 1957.
- Sasieni, M. -
Yaspan, A. -
Friedman, L.: Methoden und Probleme der Unternehmensforschung - Operations Research.
Dt.: Künzi, H.P.
Würzburg 1962.
- Schäfer, E.: Grundlagen der Marktforschung.
3. Aufl. und 4. neubearb. und erw. Aufl.
Köln - Opladen 1953 / 1966.
- Schäfer, E.: Die Unternehmung. 4. Aufl.
Köln - Opladen 1961.
- Schäfer, E.: Betriebswirtschaftliche Marktforschung.
Essen 1955.
- Schäfer, E.: Der Industriebetrieb. Industriebetriebslehre auf typologischer Grundlage. Bd. 1.
Köln - Opladen 1969.

- Schmalenbach, E.: Grundlagen der Selbstkostenrechnung und Preispolitik. 4. Aufl. Leipzig 1927.
- Schmalenbach, E.: Pretiale Wirtschaftslenkung - Die optimale Geltungszahl, Bd. 1. Bremen - Horn 1947.
- Schmalenbach, E.: Selbstkostenrechnung und Preispolitik. 7. Aufl. Leipzig 1934.
- Schmidt, K.-U.: Graphisch-mathematische Methoden der Wirtschaftswissenschaften. Meisenheim am Glan 1964.
- Schneider, E.: Einführung in die Wirtschaftstheorie. Bd. 2, 5. Aufl. Tübingen 1964.
- Schönpflug, Fr.: Betriebswirtschaftslehre, Methoden und Hauptströmungen. 2. erw. Aufl. Hrsg.: Seischab, H. Stuttgart 1954.
- Schulz, H.: Die Geschichte der Glaserzeugung. Leipzig 1928.
- Schupp, R.: Das Tafelglas als Kultur-, Erzeugungs- und Wirtschaftsfaktor in Deutschland. Manuskript im Besitz der DETAG, Fürth/Bay.
- Schweitzer, M.: Probleme der Ablauforganisation in Unternehmungen. Berlin 1964.
- Shackle, G.L.S.: Expectation in Economics. 2d ed. Cambridge 1952.
- Smith, W.E.: Applications of A Posteriori Probability. Research Report Nr. 56 UCLA. Management Sciences Research Project. Zitiert nach Sisson: Sequencing Theory. Sept. 1958.
- Sokolizyn, S.A.: Primenenie Teorii Verogatnotey Dlja Opredelenija Mezoperacionnago Vremeni (Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung zur Bestimmung der Zwischenoperationszeit) Trudy Leningradskogo Politechnicenskogo Institutaimeni M.J. Kalinina Nr. 214, 1960.

- Springer, L.: Lehrbuch der Glastechnik. 5. Aufl.
Düsseldorf 1963.
- Starr, M.K. -
Miller, D.W.: Inventory Control: Theory and
Practice.
Englewood Cliffs 1962.
- Thüring, B.: Einführung in die Methoden der Pro-
grammierung.
Baden-Baden 1957.
- Vajda, S.: Theorie der Spiele und Linearpro-
grammierung.
Dt.: Kesting, H. - Rittel, H.
Engl.: The Theory of Games and Li-
near Programming.
Berlin 1962.
- Vavra, J.R.: Das Glas und die Jahrtausende.
Prag 1954.
- Vazsonyi, A.: Die Planungsrechnung in Wirtschaft
und Industrie.
Dt.: Riedler, W.
Wien - München 1962.
- Völckers, O.: Glas und Fenster.
Berlin 1939.
- Vokuhl, F.: Möglichkeiten der Anwendung der li-
nearen Programmierung in Industrie-
betrieben.
Berlin 1965.
- Vopelius, E.: Entwicklungsgeschichte der Glasin-
dustrie Bayerns (nach seinem heuti-
gen Umfang) bis 1806.
Stuttgart 1895.
- Wagner, H.M.: Statistical Management of Inventory
Systems - Publication in Operations
Research Nr. 6.
New York - London 1962.
- Waffenschmidt,
W.G.: Technik und Wirtschaft der Gegen-
wart.
Berlin - Göttingen - Heidelberg
1952.
- Weber, H.: Die Planung in der Unternehmung.
Nürnberger Abhandlungen zu den Wirt-
schafts- und Sozialwissenschaften,
Heft 19.
Berlin 1963.

- Weblus, B.: Produktionseigenarten der chemischen Industrie, ihr Einfluß auf Kalkulation und Programmgestaltung. Berlin 1958.
- Whitin, Th.M.: The Theory of Inventory Management. 2nd ed. Princeton, N.J. 1957.
- Wille, H. -
Gewald, K. -
Weber, H.D.: Netzplantechnik - Methoden zur Planung und Überwachung von Projekten. München - Wien 1966.
- Williams, J.D.: The Compleat Strategyst. 6th Printing (keine Angabe d.J.) 1st Edition 1954 New York.
- Wittmann, W.: Unternehmung und unvollkommene Information. Köln - Opladen 1959.
- Wöhe, G.: Methodologische Grundprobleme der Betriebswirtschaftslehre. Meisenheim am Glan 1959.
- Woitschach, M. -
Wenzel, G.: Lineare Planungsrechnung in der Praxis - Linear Programming. 2. verb. Aufl. Stuttgart o.J.
- Zimmermann, W.: Modellanalytische Verfahren zur Bestimmung optimaler Fertigungsprogramme. Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der Operations Research Verfahren im Bereich der Programmplanung. Berlin 1966.

IV. Zeitschriftenaufsätze

- Adam, D.: Simultane Ablauf- und Programmplanung bei Sortenfertigung mit ganzzahliger linearer Programmierung.
In: ZfB 1963 (33), S. 233 - 245.
- Albach, H.: Lineare Programmierung als Hilfsmittel betrieblicher Investitionsplanung.
In: ZfhF (NF) 1960 (12), S. 546 - 549.
- Algan, M.: Reihenfolgeprobleme und Graphentheorie.
In: Ufo 1964 (8), S. 53 - 64.
- Allais, M.: Puissance et dangers de l'utilisation de l'outil mathématique en économique.
In: Econometrica 1954 (22), S. 58 - 71.
- Arrow, K.J. -
Harris, Th. -
Marschak, J.: Optimal Inventory Policy.
In: Econometrica 1951 (19), S. 250 - 272.
- Baker, C.T. -
Dzielinski, B.F.: Simulation of a Simplified Job Shop.
In: Mgmt. Sci. 1960 (6), S. 311 - 323.
- Barlow, R.E. -
Hunter, L.C.: Reliability Analysis of a One - Unit System.
In: JORSA 1961 (9), S. 200 - 208.
- Beck, M.: Besondere Merkmale der kausalen Folge in der Betriebswirtschaftslehre.
In: ZfB 1957 (27), S. 401 - 411.
- Beckmann, M.J.: Lineares Programmieren und neoklassische Theorie.
In: Weltwirtschaftliches Archiv 1960 (84), S. 39 - 50.
- Beckmann, M.J.: Production Smoothing and Inventory Control.
In: JORSA 1961 (9), S. 456 - 467.
- Beer, St.: What has Cybernetics to do with Operational Research.
In: Oper.Res.Quarterly 1959 (10), S. 1 - 21.

- Bellmann, R.: Dynamic Programming and the Smoothing Problem.
In: Mgmt. Sci. 1956 (3), S. 111 - 113.
- Bellmann, R.: Some Applications of the Theory of Dynamic Programming - A Review.
In: JORSA 1954 (2), S. 275 - 288.
- Beste, Th.: Die Produktionsplanung.
In: ZfhF 1938 (32), S. 345 - 371.
- Bishop, G.T.: On a Problem of Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming.
In: JORSA 1957 (5), S. 97 - 103.
- Bleicher, K.: Entscheidungssimulation und Unternehmungsspiele.
In: ZfB 1962 (32), S. 15 - 30.
- Böhm, H.-H.: Mathematik und Betriebswirtschaft - Einige Bemerkungen zu dem gleichnamigen Aufsatz von Dr. Löffelholz.
In: ZfB 1955 (25), S. 562 - 568.
- Boss, J.-P.: Simulation des Verkehrs auf einer Autobuslinie.
In: Ablauf- und Planungsforschung, 1961 (2), S. 234 - 237.
- Bovaird, R.L.: Characteristics of Optimal Maintenance Policies.
In: Mgmt. Sci. 1961 (7), S. 238 - 253.
- Bowman, E.H.: Assembly-Line Balancing by Linear Programming.
In: JORSA 1960 (8), S. 385 - 390.
- Bowman, E.H.: The Schedule Sequencing Problem.
In: JORSA 1959 (7), S. 621 - 624.
- Bowman, E.H.: Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming.
In: JORSA 1956 (4), S. 100 - 103.
- Breu, M.: Netzplantechnik im Terminwesen.
In: Industrielle Organisation 1962 (31), S. 297 - 366.
- Budil, W.: Die Praxis der Netzplantechnik.
In: Industrielle Organisation 1964 (33), S. 303 - 316.

- Charnes, A. - The Stepping Stone Method of Explaining Linear Programming Calculations in Transportation Problems.
Cooper, W.W.: In: Mgmt. Sci. 1954 (1), S. 49 - 69.
- Charnes, A. - Blending Aviation Gasolines - A
Cooper, W.W. - Study in Programming Interdependent
Mellon, B.: Activities in an Integrated Oil Company.
In: Econometrica 1952 (20), S. 135 - 159.
- Conway, R.W. - Network Dispatching by the Shortest
Maxwell, W.L.: Operation Discipline.
In: JORSA 1962 (10), S. 51 - 73.
- Danø, S. - Production and Inventory Planning in
Jensen, E.L.: a Fluctuating Market.
In: Metrika 1958 (1), S. 28 - 40.
- Dantzig, G.B.: A Machine-Job-Scheduling Model.
In: Mgmt. Sci. 1960 (6), S. 191 - 196.
- Derman, C.: Optimal Replacement and Maintenance under Markovian Deterioration with Probability Bounds on Failure.
In: Mgmt. Sci. 1963 (9), S. 478 - 481.
- Dickie, H.F.: ABC Inventory Analysis Shoots for Dollars, Not Pennies.
In: Factory Management and Maintenance 1951, Vol. 109, Nr. 7, S. 92 - 94.
- Dinkelbach, W. - Die Anwendung der gemischt ganzzahligen linearen Programmierung auf betriebswirtschaftliche Entscheidungsprobleme.
Hax, H.: In: ZfhF (NF) 1962 (14), S. 179 - 196.
- Dvoretzky, A. - On the Optimal Character of the (s.S.) Policy in Inventory System.
Kiefer, J. - In: Econometrica 1953 (21), S. 586 - 596.
Wolfowitz, J.:
- Egert, Ph.: Probleme des Produktionsausgleichs.
In: Ufo 1961 (5), S. 216 - 226.
- Eiseman, K.: The Trim Problem.
In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 279 - 284.

- Engelmann, K.: Zur Frage des pagatorischen Kostenbegriffes.
In: ZfB 1959 (29), S. 166 - 177.
- Erdlen, M.: Zur optimalen Lösung von Lagerhaltungsproblemen durch elektronische Datenverarbeitungsanlagen.
In: IBM-Form 78103.
- Erklärungen über Stochastik.
In: Ufo 1958 (2), S. 44/45.
- Fabian, R.: A Linear Programming Model of Integrated Iron and Steel Production.
In: Mgmt. Sci. 1958 (4), S. 415 - 449.
- v.Falkenhausen, H.: Prinzipien und Rechenverfahren der Netzplantechnik.
In: ADL-Nachrichten 1964 (9), S. 19 - 30, 268 - 279, 340 - 354.
- v.Falkenhausen, H.: Optimallösungen für Entscheidungsfolgen. Ermittlung durch analytische Methoden (dynamic programming) und Simulation.
In: IBM-Form 78105 - 11.63.
- FAZ: Fensterglaskartell darf wirksam werden.
In: FAZ v. 22.4.1968, S. 13.
- Ferbig, G. - Joseph, S.: Zur Bedeutung der Netzwerkanalyse für die Planung und Abwicklung von Investitionsvorhaben.
In: Statistische Praxis 1964 (19), S. 151 - 156.
- Ferschl, F.: Zum Problem der optimalen Zusatzbestellung.
In: Ufo 1961 (5), S. 121 - 131.
- Firmenzeitschrift der Deutschen Libbey Owens Gesellschaft DELOG.
Februar 1961.
- Flessa, K.: Über die Herstellung von Tafelglas.
In: Glaswelt 1964 (17), S. 320 - 321.
- Förstner, K.: Bemerkungen zur Wirtschaftsmechanik.
In: ZfB 1959 (29), S. 38 - 48.

- Förstner, K.: Betriebs- und Volkswirtschaftliche Produktionsfunktion.
In: ZfB 1962 (32), S. 264 - 282.
- Frenckner, T.P.: Betriebswirtschaftslehre und Verfahrensforschung - Operations Research.
In: ZfhF (NF) 1957 (9), S. 65 - 102.
- Frenckner, T.P.: Bestimmung des Produktionsprogrammes als Anwendungsbeispiel der Linearplanung.
In: ZfhF (NF) 1958 (10), S. 565 - 594.
- Garvin, W.W. -
Crandall, H.W. -
John, J.B. -
Spellman, R.A.: Application of Linear Programming in the Oil Industry.
In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 407 - 430.
- Giffler, B. -
Thompson, G.L.: Algorithms for Solving Production Scheduling Problems.
In: JORSA 1960 (8), S. 487 - 503.
- Gilmore, P.C. -
Gomory, R.E.: A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem.
In: JORSA 1961 (9), S. 849 - 859.
- Graver, D.P. jr.: Operations Characteristics of a Simple Production, Inventory - Control Model.
In: JORSA 1961 (9), S. 635 - 649.
- Gutenberg, E.: Planung im Betrieb.
In: ZfB 1952 (22), S. 669 - 684.
- Gutenberg, E.: Anmerkungen zur Frage der Gestaltung industrieller Produktionsprogramme.
In: ZfB 1964 (34), S. 667 - 675.
- Gutjahr, A.L. -
Nemhauser, G.L.: An Algorithm for the Line Balancing Problem.
In: Mgmt. Sci. 1965 (11), S. 308 - 316.
- Harling, J.: Simulation Techniques in Operations Research - a Review.
In: JORSA 1958 (6), S. 307 - 319.
- Hartmann, B.: Die Weiterentwicklung der Betriebswirtschaftslehre.
In: ZfB 1963 (33), S. 65 - 75.

- Hasenack, W.: Mensch im Betrieb. Inwieweit kann oder muß die Betriebswirtschaftslehre den Menschen in ihre Untersuchungen einbeziehen.
In: ZfB 1961 (31), S. 577 - 596.
- Hax, H.: Die Gestaltung des Fertigungsprogrammes unter Berücksichtigung produktionswirtschaftlicher und absatzwirtschaftlicher Faktoren.
In: BFuP 1968 (10), S. 498 - 517.
- Heil, H.: Simulation in der Datenverarbeitung - Der GPSS General Purpose Systems Simulator.
In: IBM Nachrichten 1966 (16), S. 281 - 286.
- Heine, P.: Direct Costing - eine anglo-amerikanische Teilkostenrechnung.
In: ZfhF (NF) 1959 (11), S. 515 - 534.
- Held, M. -
Karp, R.M. -
Shareshian, R.: Assembly-Line Balancing - Dynamic Programming with Precedence Constraints.
In: JORSA 1963 (11), S. 442 - 459.
- Helgerson, W.B. -
Kwo, T.T.: Letter to the Editor.
In: Mgmt. Sci. 1956 (3), S. 115.
- Helgerson, W.B. -
Birnie, D.P.: Assembly Line Balancing Using the Ranked Positional Weight Technique.
In: J.Ind.Engng. 1961 (12), S. 394 - 398.
- Henderson, A. -
Schlaifer, R.: Mathematical Programming - Better Information for Better Decision Making.
In: Harvard Business Review 1954 (32), S. 74 - 100.
- Henn, R.: Strategische Spiele und unternehmerische Entscheidungen.
In: ZfB 1958,(28), S. 277 - 286.
- Herlt, R.: Britische Glas-Revolution.
In: "Die Welt" vom 16.8.1965, S. 8.
- Henzel, F.: Finanzierung und Lagerhaltung.
In: ZfB 1962 (32), S. 560 - 575.
- Higham, J.B.: Qualitäts-Tafelglas durch "Float"-Verfahren.
In: Glaswelt 1963 (7), S. 310 - 312.

- Higham, J.B.: Qualitäts-Tafelglas durch "Float"-Verfahren.
In: Glas-Email-Keramo-Technik 1963, S. 211 - 213.
- Hoffman, A.J. - Jacobs, W.: Smooth Patterns of Production.
In: Mgmt. Sci. 1954 (1), S. 86 - 91.
- Hoffmann, Th.R.: Assembly Line Balancing with a Precedence Matrix.
In: Mgmt. Sci. 1963 (9), S. 551 - 562.
- Holt, C.C. - Modigliani, F. - Simon, H.A.: A Linear Decision Rule for Production and Employment Scheduling.
In: Mgmt. Sci. 1955 (2), S. 1 - 30.
- Holt, C.C. - Modigliani, F. - Muth, J.F.: Derivation of a Linear Decision Rule for Production and Employment Scheduling.
In: Mgmt. Sci. 1956 (2), S. 159 - 177.
- Holzer, H.F. - Karling, F.: Netzwerkanalysen (PERT und CPM) als Mittel der Planung.
In: Die Wirtschaftsprüfung 1964 (17), S. 145 - 149.
- Hox, G.: Erweiterte Anwendung von Linear Programming bei der Belegung von Papiermaschinen.
In: Ablauf- und Planungsforschung 1964 (5), S. 26 - 33.
- Hu, T.C. - Frager, W.: Network Analysis of Production Smoothing.
In: Nav.Res.Log.Quarterly 1959 (6), S. 17 - 24.
- IBM-Einführungsschrift: Lagerhaltungssimulation.
In: IBM-Form 74890.
- IBM-Einführungsschrift: Einführungsschrift - PERT ... eine dynamische Methode zur Projektplanung und -überwachung.
In: IBM-Form 71338.
- Jackson, J.R.: A Computing Procedure for a Line Balancing Problem.
In: Mgmt. Sci. 1956 (2), S. 261 - 271.
- Jackson, J.R.: An Extension of Johnson's Result on Job Lot Scheduling.
In: Nav.Res.Log. Quarterly 1956 (3), S. 201 - 203.

- Jackson, J.R.: Simulation Research on Job Shop Production.
In: Nav.Res.Log.Quarterly 1957 (4), S. 287 - 295.
- Jackson, J.R.: Jobshop - Line Queueing Systems.
In: Mgmt. Sci. 1963 (10), S. 131 - 142.
- Jaeschke, G.: Das Reihenfolgeproblem für Erzeugnisse mit gleichem Ablaufplan (RFI).
In: IBM-Form 78104, Böblingen 1963.
- Jaeschke, G.: Eine Methode zur Lösung des Reihenfolgeproblems vom Typ "Identical Routing".
In: IBM-Form 78133. 9. 65.
- Jennings, N.H. - Computer Simulation of Peak Hour
Dickins, J.H.: Operations in a Bus Terminal.
In: Mgmt. Sci. 1958 (5), S. 106 - 120.
- Johnson, S.M.: Sequential Production Planning Over Time at Minimum Cost.
In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 435 - 437.
- Johnson, S.M.: Discussion.
In: Mgmt. Sci. 1959 (5), S. 299 - 303.
- Ischboldin, B.: Zur Kritik der mathematischen Methode in den Wirtschaftswissenschaften.
In: ZfhF (NF), 1960 (12), S. 209 - 224.
- Karush, W. - Mathematical Programming and Service
Vazsonyi, A.: Scheduling.
In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 140 - 148.
- Kattwinkel, W.: Über 2 Anwendungsmöglichkeiten von Netzwerken mit gerichteten Teilstrecken (directed graphs).
In: IBM-Form 78101.
- Kawaratani, T.K. - Computing Tetraethyl - Lead Requirements in a Linear Programming Format.
Ullman, R.J. -
Dantzig, G.B.:
In: JORSA 1960 (8), S. 24 - 29.
- Kay, E.: Wesen und Grenzen der Simulation.
In: Ablauf- und Planungsforschung, 1963 (4), S. 191 - 194.

- Kern, W.: Gestaltungsmöglichkeiten und Anwendungsbereich betriebswirtschaftlicher Planungsmodelle.
In: ZfhF (NF) 1962 (14), S. 167 - 179.
- Kern, W.: Operations Research als Optimierungskunde.
In: ZfhF (NF) 1963 (15), S. 345 - 349.
- Kelly, E.J. jr.: Critical Path Planning and Scheduling. Mathematical Basis.
In: JORSA 1961 (9), S. 296 - 320.
- Kilbridge, M. - Wester, L.: The Balancing Delay Problem.
In: Mgmt. Sci. 1961 (8), S. 69 - 84.
- Kilbridge, M. - Wester, L.: A Review of Analytic Line Balancing.
In: JORSA 1962 (10), S. 626 - 638.
- Kilbridge, M. - Wester, L.: A Heuristic Method of Assembly Line Balancing.
In: J.Ind.Engng. 1961 (12), S. 292 - 298.
- Klahr, C.N.: Multiple Objectives in Mathematical Programming.
In: JORSA 1958 (6), S. 849 - 855.
- Klein, M.: On Production Smoothing.
In: Mgmt. Sci. 1961 (7), S. 286 - 293.
- Klein, M.: On Assembly Line Balancing.
In: JORSA 1963 (11), S. 274 - 281.
- Klein, M.: Inspection - Maintenance - Replacement - Schedules under Markovian Deterioration.
In: Mgmt. Sci. 1963 (9), S. 25 - 32.
- Knayer, M.: Die Ablauf- und Planungsforschung.
In: Rationalisierung 1953 (4), S. 273 - 276.
- Knayer, M.: Optimale Einkaufsmenge bei Preiserhöhungen.
In: Ablauf- und Planungsforschung 1961 (3/4), S. 47 - 50.
- Knayer, M.: Zur Diskussion in der Ungewißheitstheorie.
In: ZfhF (NF) 1960 (12), S. 49 - 75.

- Koch, H.: Das Wirtschaftlichkeitsprinzip als betriebswirtschaftliche Maxime.
In: ZfhF (NF) 1951 (3), S. 160 - 170.
- König, J.W.J.: Produktionsplanung bei unsicheren Absatzmengen.
In: Erdöl und Kohle. - Erdgas - Petro-Chemie 1964 (17), S. 729 - 735.
- Koller, H.: Simulation als Methode der Betriebswirtschaft.
In: ZfB 1966 (36), S. 95 - 110.
- Kosiol, E.: Die Ermittlung der optimalen Bestellmenge.
In: ZfB 1958 (28), S. 287 - 299.
- Kosiol, E.: Modellanalyse als Grundlage unternehmerischer Entscheidungen.
In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 318 - 334.
- Kosiol, E.: Betriebswirtschaftslehre und Unternehmensforschung. Eine Untersuchung ihrer Standorte und Beziehungen auf wissenschaftstheoretischer Grundlage.
In: ZfB 1964 (34), S. 742 - 762.
- Kregeloh, H.: Ziel und Wesen von Operations Research.
In: ZwF 1960 (55), S. 316 - 364.
- Krelle, W.: Überblick über die Problemgruppen der Unternehmensforschung und den Stand der Anwendung.
In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 335 - 353.
- Levy, F.K. - Thompson, G.L. - Wiest, J.D.: Multiship, Multishop, Workload - Smoothing Program.
In: Nav.Res.Log.Quarterly 1962 (9), S. 37 - 44.
- Littger, K.: Bearbeitung komplexer Reihenfolgeprobleme mit elektronischen Datenverarbeitungsanlagen.
In: IBM-Form 78100, 10.63.
- Littger, K.: Planung und Steuerung von Fertigungsprozessen mit IBM Datenverarbeitungssystemen.
In: IBM-Form 81504, 11.65.

- Löffelholz, J.: Mathematik und Betriebswirtschaft.
In: ZfB 1965 (25), S. 385 - 394.
- Maak, H.: Gedanken zum zweidimensionalen Ver-
schnittproblem.
In: IBM-Form 78109. 11.63.
- Mansoor, E.M.: Assembly Line Balancing - An Impro-
vement on the Ranked Positional
Weight Technique.
In: J.Ind.Engng. 1964 (15), S. 73 -
77.
- Manne, A.S.: A Note on the Modigliani - Holt
Production Smoothing Model.
In: Mgmt. Sci. 1957 (3), S. 371 -
379.
- Manne, A.S.: On the Job-Shop-Scheduling-Problem.
In: JORSA 1960 (8), S. 219 - 223.
- Mattesich, R.: Unternehmensforschung.
In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 411 -
423.
- Mc Closkey - Swan: The Name and the Nature of OR - A
Schriftwechsel: Correspondence.
In: Operat. Res. Quarterly 1957 (8),
S. 1 - 5.
- Mertens, P.: Netzwerktechnik als Instrument der
Planung.
In: ZfB 1964 (34), S. 382 - 407.
- Mitten, L.G.: A Scheduling Problem.
In: J.Ind.Engng. 1959 (10), S. 131 -
134.
- Modigliani, F. - Production Planning over Time and
Hohn, F.E.: the Nature of the Expectation and
Planning Horizon.
In: Econometrica 1955 (23), S. 26 -
46.
- Moxter, A.: Grenzen der Verfahrensforschung
(Operations Research) im betriebs-
wirtschaftlichen Bereich.
In: Der Österreichische Betriebs-
wirt, 1963 (13), S. 181 - 205.
- Müller-Merbach, H.: Sensibilitätsanalyse der Losgrößen-
bestimmung.
In: Ufo 1962 (6), S. 79 - 88.

- Müller-Merbach, H.: Optimale Einkaufsmengen.
In: Ablauf- und Planungsforschung
1963 (8), S. 226 - 237.
- Müller-Merbach, H.: Operations Research als Optimalplanung.
In: ZfhF (NF) 1963 (15), S. 191 - 206.
- Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen bei mehrstufiger Fertigung.
Sonderdruck aus: Zwf 1965 (60),
S. 113 - 118.
- Müller-Merbach, H.: Optimale Losgrößen in der Einkaufs- und Fertigungsdisposition.
In: ADL-Nachrichten 1965 (10), S. 626 - 653, Teil I,
ADL-Nachrichten 1966 (11), S. 10 - 33, Teil II.
- Müller-Merbach, H.: Lineare Planungsrechnung und industrielle Anwendung I und II
In: Zeitschrift für das Gesamte Rechnungswesen 1967 (13), S. 48 - 52 (I), S. 89 - 92 (II).
- Müller-Merbach, H.: Lineare Planungsrechnung.
In: ADL-Nachrichten 1968 (13),
S. 162 - 170.
- Munz, M.: Technik und Anwendungsmöglichkeiten der dynamischen Planungsrechnung.
In: ZfB 1959 (29), S. 357 - 365.
- Munz, M.: Die Monte-Carlo-Methode - Ein neues Planungsverfahren für den Handelsbetrieb.
In: ZfhF (NF) 1959 (11), S. 615 - 623.
- Nowak, F.: Bestimmung der Betriebsindividualität mit Hilfe von Betriebsgliederungen.
In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 48 - 53.
- ohne Verfasser: Europäische Hütten produzieren "Float Glas".
In: Glaswelt 1963 (7), S. 127 - 128.
- ohne Verfasser: Spiegelglas ohne Schleifen.
In: FAZ vom 27.8.63.

Operations Research-Unternehmensforschung:

- Die Spieltheorie.
In: Betriebswirtschaftliches Repetitorium, Beilage zu ZfB 1959 (29), S. 49 - 50.
- Opfermann, K. -
Reinermann, H.: Opportunitätskosten, Schattenpreise und optimale Geltungszahl - Ein Vergleich klassischer und moderner Optimalkalküle.
In: ZfB 1965 (35), S. 211 - 236.
- Orth, L.: Die Eignung der Losgrößenformel als Instrument der Produktionsplanung.
In: ZfhF (NF) 1961 (13), S. 538 - 549.
- Pack, L.: Rationalprinzip und Gewinnmaximierungsprinzip.
In: ZfB 1961 (31), S. 207 - 220, 283 - 290.
- Pahlitzsch, G. -
Berr, U.: Über mathematische Modelle zur Fertigungssteuerung in der Metallindustrie.
In: Werkstattstechnik 1960 (50), S. 465 - 470.
- Pahlitzsch, G. -
Berr, U.: Ein Verfahren zur Fertigungssteuerung in der Metallindustrie mit gekoppelten mathematischen Modellen I. und II. Teil.
In: Werkstattstechnik 1962 (52), S. 224 - 230, 401 - 406.
- Paull, A.E.: Linear Programming: A Key to Optimum Newsprint Production.
In: Pulp and Paper Magazine of Canada 1956 (57), S. 145 - 150.
- Pfanzagl, J.: Minimierung sinnloser Größen.
In: Ufo 1960, S. 149 - 155.
- Piehler, J.: Ein Beitrag zum Reihenfolgeproblem.
In: Ufo 1960 (4), S. 138 - 142.
- Plaut, H.G.: Die Grenzplankostenrechnung in der Diskussion und ihre weitere Entwicklung.
In: ZfB 1958 (28), S. 251 - 266.
- Popp, W.: Simulationstechnik bei Lagerplanung mit stochastischer Nachfrage.
In: Ufo 1963 (7), S. 65 - 74.

- Preuschen, G.: Operational Research in German Agriculture.
In: RESEARCH, Applied in Industry, S. 445 - 458, London 1949.
- v. Rago, L.J.: Operations Research im Industriebetrieb. - Zum Problem optimaler Kapazitätsausnützung.
In: ZfB 1962 (32), S. 403 - 418.
- Reichardt, H.: Zur operativen Bedeutung der quantitativen Wirtschaftstheorie.
In: Z.f.d.ges. Staatswissenschaft 1964 (120), S. 666 - 677.
- Rehm, Th.: Plankosten und Plannutzen.
In: ZfB 1950 (29), S. 472 - 475.
- Riebel, P.: Das Rechnen mit Einzelkosten und Deckungsbeiträgen.
In: ZfhF (NF) 1959 (11), S. 213 - 238.
- Rogers, J.A.: A Computational Approach to the Economic Lot Scheduling Problem.
In: Mgmt. Sci. 1958 (4), S. 264 - 291.
- Rowe, A.J.: Toward a Theory of Scheduling.
In: J.Ind.Engng. 1960 (11), S. 125 - 136.
- Ruiz - Pala, E. - Avila, K.: Einige Anwendungen der Warteschlangentheorie auf dem Gebiet der Produktion. Die Fertigungszeiten bei der Serienproduktion.
In: ZfB 1964 (34), S. 172 - 180.
- Salveson, M.E.: The Assembly Line Balancing Problem.
In: J.Ind. Engng. 1955 (6), S. 18 - 25.
- Salveson, M.E.: A Problem in Optimal Machine Loading.
In: Mgmt. Sci. 1956 (2), S. 232 - 260.
- Schäfer, E.: Losgröße und Kostengestaltung.
In: ZfB 1931 (8), S. 823 - 832.
- Schild, A.: On Inventory, Production and Employment Scheduling.
In: Mgmt. Sci. 1959 (5), S. 157 - 168.

- Schneeweiss, H.: Zur Theorie der Warteschlangen.
In: ZfhF (NF) 1960 (12), S. 471 - 507.
- Schneider, E.: Sinn und Grenzen der Wirtschaftsfor-
schung.
In: Z.f.d.ges. Staatswissenschaft
1952 (108), S. 594 - 610
- Schneider, E. -
Jessen, B.: Absatz, Produktion und Lagerhaltung
bei einfacher Produktion.
In: Archiv für Mathematische Wirt-
schafts- und Sozialforschung, 1938,
Bd. IV, S. 99 - 120.
- Schwarz, W.: Zur Bedeutung und Berücksichtigung
nicht oder nur schwer quantifizier-
barer Faktoren im Rahmen des inve-
stitionspolitischen Entscheidungs-
prozesses.
In: BFuP 1960 (12), S. 686 - 696.
- Seitz, R.: Erzeugung von Permutationen im Re-
chenautomaten mittels zyklischer
Operationen.
In: Ufo 1962 (6), S. 2 - 15.
- Seitz, R.: Ermittlung kürzester Durchlaufzeiten
auf Fertigungsstraßen.
In: Ufo 1962 (6), S. 167 - 192.
- Siedentopf, H.: Planungsforschung.
In: Physikalische Blätter 1949,
S. 201 - 205.
- Sigg, A.: Das eindimensionale Verschnittpro-
blem.
In: IBM-Form 78108, 10.63.
- Sisson, R.L.: Methods of Sequencing in Job Shops -
A Review.
In: JORSA 1959 (7), S. 10 - 29.
- Shepard, R.W.: Linear Programming mit unbestimmten
Werten.
In: Ablauf- und Planungsforschung
1964 (5), S. 68 - 89.
- Smith, W.E.: Various Optimizers for Single Stage
Production.
In: Nav.Res.Log.Quarterly 1956 (3),
S. 59 - 66.

- Stahlknecht, P.: Operations Research - Leitfaden für den Praktiker.
Beiheft: Elektronische Datenverarbeitung.
Braunschweig 1965.
- Stravs, A.: Das optimale Sortiment eines Fabrikationsbetriebes.
In: Industrielle Organisation 1958 (27), S. 205 - 211.
- Tinbergen, J.: Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung mathematischer Verfahren in der Wirtschaftswissenschaft.
In: Z.f.d.ges. Staatswissenschaft 1949 (109), S. 638 - 652.
- Thoma, L.: In einer Glashütte für Flach- und Fensterglas.
In: Klöckner-Moeller-Post 1955, (Hauszeitschrift der Klöckner-Moeller-Elektrizitäts-GmbH), S. 54 - 63.
- Thomas, C.J. -
● Deemer, W.L.: The Role of Operational Gaming in Operations Research.
In: JORSA 1957 (5), S. 1 - 27.
- Thumb, H.: Netzplantechnik, die neue Methode der Terminplanung und Terminüberwachung.
In: Zwf 1964 (59), S. 291 - 298.
- Tonge, F.M.: Summary of a Heuristic Balancing Procedure.
In: Mgmt. Sci. 1960 (7), S. 21 - 42.
- Tonge, F.M.: The Use of Heuristic Programming in Management Science.
In: Mgmt. Sci. 1961 (7), S. 231 - 237.
- Umfrage der ZfB: Der Terminus "Operations Research und seine deutschen Übersetzungen."
In: ZfB 1962 (32), S. 363 - 370.
- Vaterodt, A.H.: FORTRAN - Programm: Bedarfs- und Verkaufsvorhersage mit Hilfe der Exponential-Smoothing Methode.
UNIVAC: Mathematisch-Technische Verfahren.
UVU-VMT: 8 - 66.
- Voorhis, V.W.R.: Waiting-Line Theory as a Management Tool.
In: JORSA 1956 (4), S. 221 - 231.

- Wagner, H.M.: An Integer Linear Programming Model for Machine Scheduling.
In: Nav.Res.Log. Quarterly 1959 (6), S. 131 - 140.
- Walther, A.: Wechselbeziehungen zwischen Rechenautomaten und Operational Research.
In: Ablauf- und Planungsforschung 1963 (4), S. 146 - 157.
- Wartmann, R.: Rechnerische Erfassung der Vorgänge im Hochofen zur Planung und Steuerung der Betriebsweise sowie der Erzauswahl.
In: Stahl und Eisen 1963 (83), H. 23, S. 1414 - 1425.
- Wedekind, H.: Ein linearer Programmansatz für das Fließbandproblem.
In: Ablauf- und Planungsforschung 1963 (4), S. 246 - 248.
- Wenke, K.: Mathematische Modelle in der Betriebswirtschaft.
In: ZfB 1956 (26), S. 48 - 53.
- Wetzel, W.: Comments on "Production Scheduling by the Transportation Method of Linear Programming".
In: JORSA 1957 (5), S. 440 - 442.
- Wetzel, W.: Lineare Verteilungsmodelle in der Betriebswirtschaft - Beispiel für den praktischen Einsatz der Linearplanung in Unternehmungen.
In: Ufo 1956/57 (1), S. 46.
- Wiese, K.-H.: Exponential Smoothing - eine Methode der statistischen Bedarfsvorhersage.
In: IBM-Form 78129. 4. 64.
- Wiese, K.-H.: Mathematische Simulationsverfahren.
In: IBM-Form 78102. 10. 63.
- Wiezorke, B.: Ein weiteres Rechenschema für die Simplexmethode.
In: Ufo 1961 (5), S. 166 - 171.
- Winkel, H.: Dynamische Planungsrechnung (Dynamic Programming).
In: ZfB 1959 (29), S. 259 - 268.
- Winkel, H.: Die Entartung linearer Planungsaufgaben.
In: ZfB 1960 (30), S. 223 - 230.

- Winters, P.R.: Forecasting Sales by Exponentially Weighted Moving Averages.
In: Mgmt. Sci. 1960 (6), S. 324 - 342.
- Wittmann, W.: Betriebswirtschaftslehre und Operations Research.
In: ZfhF (NF) 1958 (10), S. 285 - 296.
- Wittmann, W.: Lineare Programmierung und traditionelle Produktionstheorie.
In: ZfhF (NF) 1960, S. 1 - 17.
- Whitin, R.M.: Inventory - Control Research: A Survey.
In: Mgmt. Sci. 1954 (1), S. 32 - 40.
- White, W.: Comment on a Paper by Bowman - Letters to the Editor.
In: JORSA 1961 (9), S. 274 - 276.
- Wolfe, P.: The Simplex Method for Quadratic Programming.
In: Econometrica 1959 (27), S. 382 - 398.
- Wuttke, K.W.: Kosten - Einflußgrößenrechnung.
In: ZfB 1958 (28), S. 385 - 396.

Lebenslauf

=====

Am 9.7.1940 wurde ich als einziger Sohn des damaligen Bezirksmonteurs Hans Walberer und seiner Ehefrau Luise, geb. Gebhardt in Pressath/Opf. geboren. Ich besuchte 5 Jahre die Volksschule meines Heimatortes und wechselte dann in die Oberrealschule in Weiden/Opf. über, wo ich 1960 die Reifeprüfung ablegte. Nach 15-monatigem Wehrdienst begann ich noch im Januar 1962 - bedingt durch eine Pflichtwehrübung während der Berlinkrise - das Studium der Betriebswirtschaft, das ich im Frühjahr 1966 abschloß.

Meine Praktika absolvierte ich bei Porzellan- und Glasfirmen und während eines Frankreichaufenthaltes. Nach dem Diplomexamen war ich 5 Monate bei der Wirtschaftszeitschrift "The Economist" in London im Marketing-Bereich tätig, bevor ich mit der Abfassung der Dissertation begann. Seit Mitte 1967 bin ich als Teilzeitbeschäftigter im Rechnungswesen und später als Vorstandsassistent ganztägig bei einer Glasfabrik beschäftigt.

BAMBERGER FOTODRUCK · RUDOLF RODENBUSCH
8600 BAMBERG-Markusplatz 22 · Telefon : 0951/62794